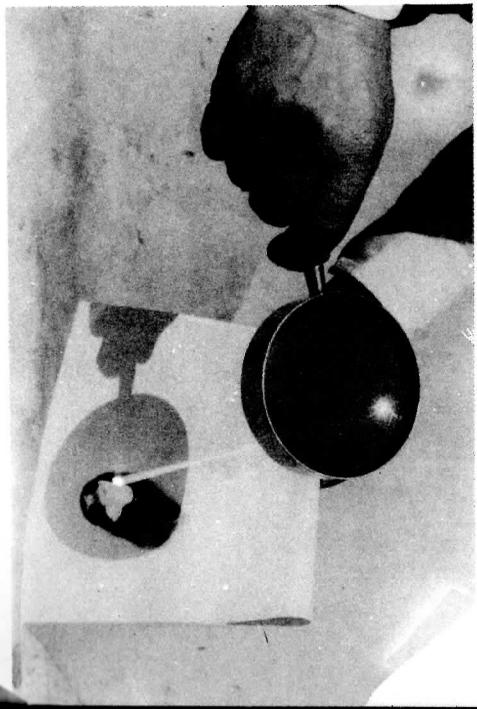
INTRODUCCIÓN



2

A LA FÍSICA

ALBERTO P. MAIZTEGUI
PROFESOR DE FISICA Y DE MATEMATICA.
DOCTOR EN CIENCIAS FISICOMATEMATICAS.
JORGE A. SABATO
PROFESOR DE FISICA.

EDITORIAL
KAPELUSZ
Moreno 372 • Buenos Aires

NUEVA EDICIÓN ACTUALIZADA

(y con Índice temático)

Están prohibidas y penadas por la ley la reproducción y la difusión totales o parciales de esta obra, en cualquier forma, por medios mecánicos o electrónicos, inclusive por fotocopia, grabación magnetofónica y cualquier otro sistema de almacenamiento de información, sin el previo consentimiento escrito del editor.

ISBN 950-13-2026-X

Todos los derechos reservados por (©, 1955) EDITORIAL KAPELUSZ S.A. Buenos Aires. Hecho el depósito que establece la ley 11.723.

Séptima edición, julio de 1972.

LIBRO DE EDICION ARGENTINA. Printed in Argentina.

ÍNDICE

I La luz

1 La velocidad de la luz 1
¿Qué es la luz? 3
La velocidad de la luz 7
La primera medición 8
El primer método terrestre 9
El método de Foucault 9
Distancias siderales 12
Problemas 12

2 Fotometría 13
La iluminación 14
Fotómetros 17
Cantidad de luz o flujo luminoso 20
Problemas 23

II Geometría de la luz 24

3 La reflexión de la luz 25
Las leyes de la reflexión 26
Espejos planos 27
Problemas de aplicación 29
Espejos esféricos 30
Elementos principales 30
Espejos cóncavos 31
Espejos convexos 39
Aplicaciones de los espejos 41
Problemas 46

4 La refracción de la luz 48
¿Qué es la refracción? 48
Las leyes de la refracción 50
La reflexión total 54
Lámina de caras paralelas 59
Prisma 60
Desviación mínima 61
Desviación mínima e índice de refracción 61
Problemas 62

5 Las lentes 64
Las lentes convergentes 65
Las lentes divergentes 70
Potencia de una lente 72
Problemas 73

6 Instrumentos de óptica 74
El ojo humano 74
Defectos del ojo 77
Poder separadór del ojo 78
Persistencia de las imágenes 79
La lupa 80
Aumento eficaz 80
El microscopio 82
Anteojo astronómico de Képler 87
Anteojo terrestre de Galileo 88
Fotografía 88

III El mundo de las ondas 92

7 Las ondas 93
Las ondas son portadoras de energía 93
Clasificación de las ondas 95
Movimiento de una partícula 95
Cómo se propaga una onda 97
La ecuación de una onda 100
¿Cómo actúan dos ondas superpuestas? 105
El principio de Huygens 108
Problemas 110

8 El sonido 111
¿Qué es el sonido? 111
Velocidad de propagación 113
Característica de un sonido 114
Resonancia 117
Reflexión del sonido 118

9 Luz y color 122
La dispersión de la luz 122
El color y la frecuencia 123
El color y la longitud de onda 124
Espectros de emisión 129
Espectros de absorción 130
El nacimiento del análisis espectral 132
¡Cómo se produce el espectro de una sustancia! 135
Las series espectrales 137
Producción y análisis de espectros de emisión 137
Análisis químico por absorción de la luz 140

10 La naturaleza ondulatoria de la luz 142
El fenómeno de difracción (luz en la sombra) 151

11 La polarización de la luz 157
¡Cómo son las vibraciones luminosas! 159
Polarización total y polarización parcial 161

Los cristales que hacen ver doble 163
El azúcar y la luz polarizada 167
El polaroid 169

IV Magnetismo, electricidad y materia 172

12 Fenómenos magnéticos sencillos 173
Imanes naturales y artificiales 173
Campo magnético 176
Magnetismo inducido 181
El campo magnético terrestre 182

13 Fenómenos eléctricos sencillos 188
Electricidad por frotamiento 189
Atracciones y repulsiones eléctricas 189
La primera ley de la electricidad 191
Campo eléctrico 195
Inducción electrostática 199

14 Materia, electricidad y magnetismo 211
El electrón 213
El descubrimiento de la radiactividad 214
Materia y electricidad 216
Los iones 219
Interpretación moderna de los fenómenos eléctricos 219
Materia y magnetismo 221

V Energía y corriente eléctricas 224

15 La corriente eléctrica 225
Corriente de electrones 225
Generadores de energía eléctrica 227
Efectos de la corriente eléctrica 229
Sentido de la corriente 231
Intensidad de una corriente 232
Problemas 236

16 Diferencia de potencial y fuerza electromotriz 237
Energía de un circuito 237
Potencia de un aparato eléctrico 238
Tensión, voltaje o diferencia de potencial eléctrico 240
Significado físico de la diferencia de potencial 242
Cálculo de la energía eléctrica 242
Tensión y energía 243
El generador y la diferencia de potencial entre sus bornes ... 248
Fuerza electromotriz de un generador 249
Fuerza electromotriz y energía de un generador 249
Problemas 251

17 Ley de Ohm 252
Resistencia eléctrica 253
Caída de tensión 256
Fuerza electromotriz y resistencia total 257
Acoplamiento de generadores 270
Problemas 277

18 Calor eléctrico 279
La ley de Joule 279
Aplicaciones del efecto Joule 281
La lucha contra el efecto Joule 282
Iluminación eléctrica 283
Problemas 288

19 Nociones de electroquímica 290
La electrólisis 290
Las leyes de Faraday 293
Los iones y la electrólisis 297
Interpretación de algunos procesos electrolíticos 299
Problemas 302

20 Pilas, acumuladores, termoelectricidad 303
Pilas 303
La pila de Daniell 304
Hemipilas 305
Explicación del funcionamiento de la pila de Daniell 307
Polarización de las pilas 310
El principio de los acumuladores, o para qué sirve la polarización 311
Acumulador de plomo 311
La batería acumuladora común 313
Termoelectricidad 314
Pirómetros termoeléctricos 315
Problemas 317

VI Los campos 318

21 El campo magnético 319
Fuerza magnética y distancia 320
Intensidad de polo o masa magnética 320
Ley de Coulomb 321
Intensidad de campo magnético 323
Intensidad de campo y líneas de fuerza 325
Problemas 328

22 El campo eléctrico 329
Condensadores 329
Carga y descarga de un condensador 334
Constante dieléctrica de un aislador 337

Energía de un condensador 341
Potencial de un conductor 345
Capacidad de un conductor 348
Problemas 349

23 Interacción entre los campos eléctrico y magnético 351

Campos magnéticos creados por corrientes 351
Campo magnético de una corriente rectilínea 353
Campo magnético de una corriente circular 356
Campo magnético de un solenoide 359
Corrientes eléctricas producidas por campos magnéticos 361
Inducción magnética producida por corrientes eléctricas 362
Inducción electromagnética 363
Principio de la dínamo 367
El campo electromagnético 369

24 El efecto Oersted y sus aplicaciones 371

Campo magnético creado por un solenoide 371
Soleniode anular o toroidal 373
Definición de flujo magnético 374
Permeabilidad magnética de una sustancia 377
Flujo de campo y flujo de inducción 377
Densidad del flujo de inducción a través de un núcleo 378
Propiedades de la permeabilidad 378
Las sustancias ferromagnéticas 381
Circuitos magnéticos 386
Aplicaciones del efecto Oersted 389
Campanilla eléctrica 389
Relais o relevadores 390
Telégrafo 391
Fuerza de un campo magnético sobre un conductor 392
Instrumentos de medición 394
Problemas 401

25 El efecto Faraday y sus aplicaciones 403

Ley de Faraday 405
La ley de Faraday y el principio de conservación de la energía 408
Autoinducción 409
Aplicaciones del efecto Faraday 413
El teléfono 413
El micrófono 413
El teléfono automático 414
El fonógrafo 414
Amperímetro 416
Corriente alterna 416
Flujo rápidamente variable 417
Transformador 425
La bobina de Ruhmkorff 426
La bobina de ignición 426
Circuitos de C.A. con resistencias, solenoides y condensadores 427

Rectificación de corriente alterna 441
Problemas 442

26 El campo electromagnético 444
Producción y propagación del campo electromagnético 444
Funcionamiento de un circuito oscilante 444
Telegrafía sin hilos 447
El espectro electromagnético 448

VII El mundo del átomo 455

27 El electrón 455
28 Aplicaciones de la electrónica 465
Descargas en gases enrarecidos 465
Los rayos catódicos 466
Idea de la radiotelefonía 472
Idea de la televisión 476
29 Los rayos X 479
Cómo se descubrieron 479
Cómo se producen 480
¿Qué son los rayos X? 481
30 La teoría de los cuantos 485
El origen de la teoría 485
Problemas 491
31 La estructura del átomo 492
La experiencia de Rutherford 492
El átomo de Bohr 494
32 La estructura del núcleo 499
Radiactividad 499
Los rayos canales, o positivos 503
Desintegración radiactiva espontánea 505
El núcleo atómico 507
33 Transmutaciones y radiactividad artificiales 511
Las primeras transmutaciones 511
Los aceleradores de partículas 512
Los proyectiles atómicos 516
Los rayos cósmicos 519
Radiactividad artificial 520
34 La liberación de la energía nuclear 521
Equivalencia entre masa y energía 521
La fisión nuclear 523
La fusión nuclear 533
¿Dónde estudiaré Física en la Argentina? 535

AGRADECEMOS A LAS INSTITUCIONES, ENTIDADES Y PUBLICACIONES QUE SE MENCIONAN LAS FOTOGRAFÍAS QUE SU GENTILEZA NOS PERMITE INCLUIR EN ESTA OBRA

Actualité Spaciale

Agua y Energía

Bausch & Lomb

Comisión Nacional de la Energía Atómica

Comisión Nacional de la Energía Atómica (Estados Unidos de América)

Esso Oilways

Esso S. A. P. A.

IKA

International General Electric & Co.

L.S. 82 Canal 7 T.V.

Marconi Company

National Cash Register

National Geographic Society

Observatorio Astrofísico de Córdoba

Observatorio Radioastronómico Nacional de Australia

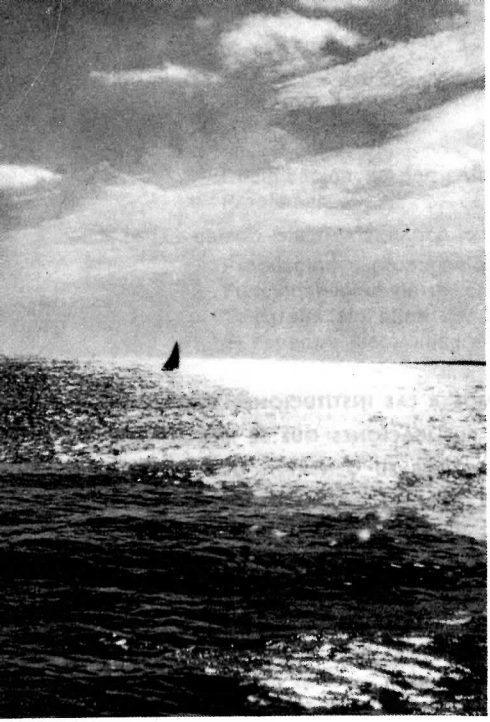
Philips Argentina S. A. Electromédica

Servicio de Informaciones de la Embajada de Estados Unidos de América

Sigwart Blum

TAMET

Union Carbide Corporation



I

LA LUZ

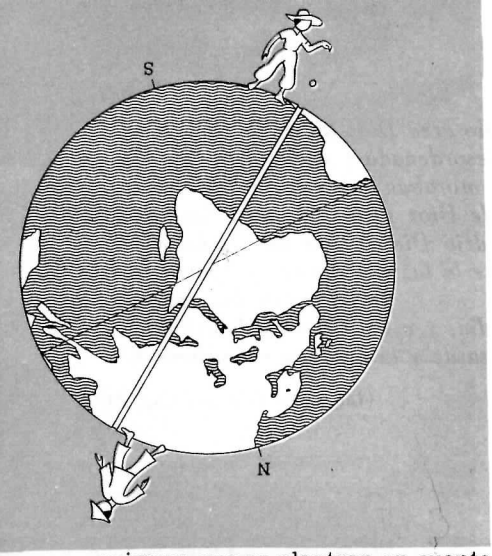
En el principio creó Dios los cielos y la tierra.
Y la tierra estaba desordenada y vacía, y las tinieblas
moraban sobre la faz del abismo,
y el espíritu de Dios se movía sobre las aguas.
Y dijo Dios: Haya luz; y hubo luz.
Y Dios vio que la luz era buena; y apartó Dios
la luz de las tinieblas.
Y llamó Dios a la luz día, y a las tinieblas llamó noche.
Y fue la tarde y la mañana del primer día.

(*Libro del Génesis*, Cap. I)

1 LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Sorprenderse y asombrarse ante cosas comunes no es una característica de tontos. Los grandes inventores y descubridores han sido por lo general personas que se asombraban ante lo que los rodeaba. Hace ya más de dos mil años un filósofo griego dijo que la admiración es la madre de la sabiduría, pues para aprender algo nuevo es necesario antes saber qué se ignora. Ante los hechos desconocidos, el hombre inteligente siente asombro primero y curiosidad después.

Pero no hay que pensar que las cosas raras se encuentran en continentes lejanos, ni en tierras exóticas, ni en otros planetas: lo curioso, lo absurdo, lo portentoso, nos rodean por todas partes, y justamente pasan inadvertidos cuando nos son cercanos y familiares. Desde niños nos dicen que la Tierra es una esfera, lo que significa que si nosotros estamos con la cabeza arriba, los habitantes de la China estarán con la cabeza abajo; he aquí un hecho asombroso, y por esto la gente se detiene a pensar en él. Hay algo más extraño todavía: los chinos dicen que ellos están cabeza arriba, y que nosotros estamos cabeza abajo. ¿Quién tiene razón? Y además ¿el que está cabeza abajo sea quien fuere, por qué no cae a los abismos intersiderales? Todos éstos son

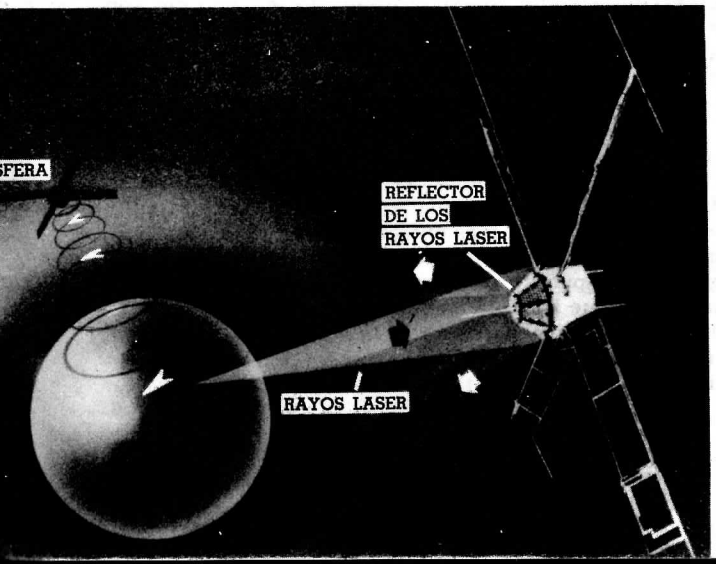


enigmas que se plantean en cuanto miramos el mundo de las cosas que nos rodean.

Se nos enseña que la Tierra gira alrededor del Sol. La distancia a este astro es de 150 millones de kilómetros y nuestro planeta describe aproximadamente una circunferencia de unos 900 millones de kilómetros de longitud. Un simple cálculo nos revela que para hacer ese recorrido en un año, la Tierra debe correr en su órbita a razon de 100 000 km/h. Cuando en automóvil pasamos los 100 km/h, no es raro que temamos por nuestras vidas. ¿Cómo es posible que viajando por los espacios a razón de 100 000 km/h no suceda ninguna catástrofe? Hay días serenos en que no se mueve una sola hoja, ni se nota la más ligera brisa; ¿cómo es posible que en ese mismo instante la Tierra viaje a velocidad tan enorme? He aquí nuevos enigmas que se refieren a hechos familiares.

Es muy fácil decir que vivimos en un planeta esférico y que ese planeta da vueltas alrededor del Sol. ¿Cómo asombrarnos ante hechos tan familiares? Hallar el misterio en todas partes, preguntar continuamente y sorprenderse ante el mundo que nos rodea: ésas son características sobresalientes de los más grandes genios que la humanidad ha conocido.

Desde pequeños nos acostumbramos a recibir con naturalidad la claridad del día y la oscuridad de la noche; nos criamos en habitaciones donde con una simple llave encendemos la lámpara y tenemos



Reconocimiento global de la ionosfera por el satélite explorador Beacon. Un rayo "laser", emitido desde la isla Wallops (Virginia), es devuelto por los reflectores de vidrio montados alrededor de la base del satélite.

a nuestra disposición tanta o más luz que en pleno día, y no nos preocupa este milagro.

Y sin embargo, ¡qué extraña y misteriosa es la luz! Si golpeamos una campana, el aire cercano vibra, y esa vibración se propaga en forma de ondas y llega a nuestros oídos. Pero, por lo menos en este caso hay *algo* que vibra y que conduce la perturbación. Pensemos qué ocurre con la luz del Sol: para llegar a la Tierra debe atravesar 150 millones de kilómetros, espacio donde no hay *nada*, ni siquiera aire. ¿Cómo puede ser esto? Se dice que la luz, como el sonido, también es un fenómeno ondulatorio; pero entonces podemos preguntarnos ¿qué es lo que ondula? ¿la nada? Y luego nos enteramos de que la luz se propaga con una velocidad de 300 000 km/s, y que sólo tarda 8 minutos para llegar desde el Sol a la Tierra. Éste es otro hecho que debe maravillarnos.

Estos interrogantes son algunos de los que hacen apasionante el estudio de la Óptica o ciencia de la luz.

Nebulosa espiral fotografiada en el Observatorio Astronómico de Córdoba (Bosque Alegre).

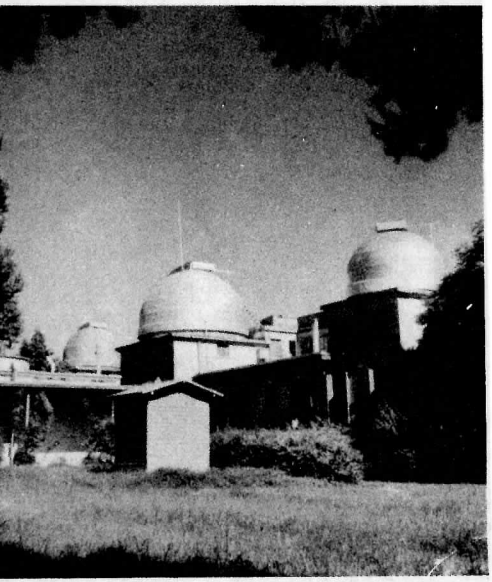
¿Qué es la luz?

Breve historia de las teorías sobre su naturaleza

¿Qué es la luz? Sabios de todas las épocas han tratado de responder a esta pregunta.

Los griegos suponían que la luz emanaba de los objetos, y que era algo así como un "espectro" de los mismos, extraordinariamente sutil, que al llegar al ojo del observador permitía verlos.

Pero es Newton quien formula la primera hipótesis seria sobre la naturaleza de la luz. Supuso que estaba formada por pequeños corpúsculos que salían del cuerpo luminoso y que al herir el ojo permitían la observación de los objetos de donde habían partido. Así explicaba el comportamiento de la luz al reflejarse en los espejos y al pasar de un medio transparente



El Observatorio Astronómico de Córdoba.

a otro, como por ejemplo del agua al aire, casos en que el rayo de luz se quiebra y se desvía de su dirección inicial. Newton sostuvo que la velocidad de la luz era mayor en el medio más denso (agua, en este caso), pues ésa era una consecuencia de su teoría corpuscular.

En la época de Newton vivió Huygens, quien emitió la hipótesis de que la luz era un fenómeno ondulatorio, de naturaleza semejante a la del sonido. La extraordinaria autoridad científica de Newton, entre otras cosas, hizo que la teoría ondulatoria de la luz tuviera que esperar muchos años antes de ser aceptada. Según esta teoría, la velocidad de la luz disminuye al penetrar en el agua, que es lo contrario de lo que se deduce de la teoría corpuscular. Esta contradicción de las dos teorías fue uno de los mayores incentivos que hubo cuando se hallaron procedimientos para medir la velocidad de la luz, pues la experiencia que permitiera determinarla decidiría cuál de las dos teorías era la más acertada. Cuando *Fizeau* y *Foucault* lo lograron, comprobaron que la luz se propaga con mayor velocidad en los medios menos densos. Esto resultó el golpe de muerte para la teoría corpuscular de Newton.

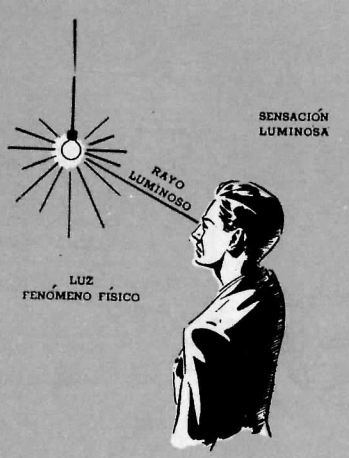
La teoría ondulatoria de la luz explicaba todos los fenómenos luminosos conocidos hasta los últimos años del siglo XIX; de ahí que se la considerase como una verdad definitiva. Pero en 1887, el físico *Hertz* descubrió un nuevo fenómeno luminoso: cuando un cuerpo cargado de electricidad era iluminado, preferentemente con luz ultravioleta, se desprendían de él cargas eléctricas negativas. A este fenómeno se le llamó efecto fotoeléctrico, y su estudio llevó a los físicos a la conclusión, confirmada por experiencias, de que sólo es explicable si se admite que la luz se comporta como si estuviera constituida por corpúsculos. En cierto modo un retorno a la teoría de Newton. Pero lo extraordinario del caso es que los fenómenos luminosos que cimentaron la teoría ondulatoria de la luz no pueden ser explicados admitiendo una naturaleza corpuscular de la misma. Y así es como los físicos de hoy se encuentran ante la curiosa duplicidad del comportamiento de la luz: en algunos fenómenos se revela como ondulatoria y en otros, tan importantes como los anteriores, como corpuscular.

Luz y sensación luminosa

Un hombre con los ojos totalmente cubiertos se halla en una habitación iluminada con una lámpara; si bien *hay luz*, el hombre no la ve, no experimenta la *sensación de luz* o *sensación luminosa*. Hay que distinguir, pues, dos hechos completamente distintos, que suelen confundirse.

1) *La luz* o *fenómeno luminoso*. Es un hecho físico que ocurre *fuera* del hombre.

2) *La sensación luminosa*. Es un hecho fisiológico, que sucede *dentro* del hombre, en sus ojos, en sus nervios, en su cerebro. Un golpe en un ojo puede "hacer ver las estrellas", es decir, provocar una sensación de luz por excitación del nervio óptico, sin que haya luz.



Hay que distinguir entre la luz, que es un fenómeno físico que ocurre fuera del hombre, y la sensación luminosa, que es un hecho subjetivo, que sucede dentro del hombre.

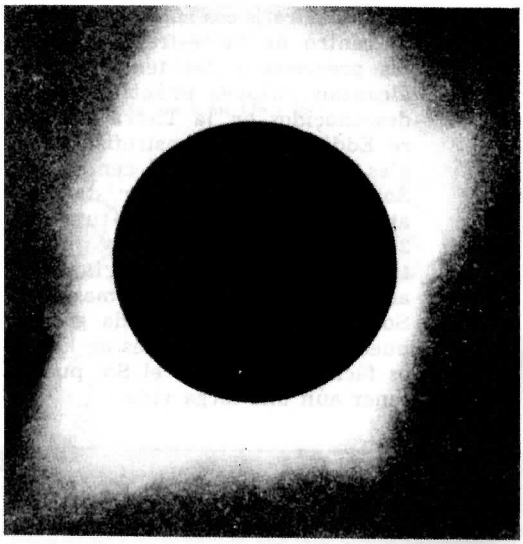
La visión de las cosas

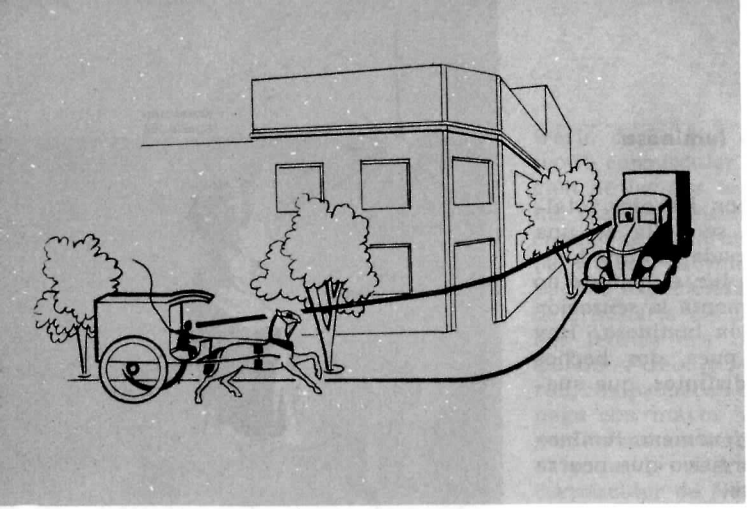
Las cosas se nos hacen visibles porque tienen luz propia o porque reflejan la luz que reciben de otros cuerpos.

Un cuerpo que produce luz: una lamparilla eléctrica encendida, un fuego, un trozo de metal al rojo, el Sol, las estrellas, se denomina *fuente de luz*. La Luna, Marte, Venus y los demás planetas no son fuentes de luz, pues sólo reflejan la luz del Sol.

El Sol es una formidable fuente de luz y calor. Según cálculos de los astrofísicos, hace por lo menos 2 000 millones de años que esta estrella lanza al espacio energía calórica y luminosa, y probablemente lo seguirá haciendo durante millones de años más. ¿Cómo es posible que durante tan increíble cantidad de años se pueda gastar tanta energía, sin que la fuente se consuma? Si el Sol fuera una esfera de carbón de la mejor calidad, su combustión duraría apenas unos 6 000 años.

Corona solar. Fotografía tomada en Kartum, Sudán.





¡Cuántos choques se evitarían si la luz se curvara . . . !

Durante muchísimos años los hombres de ciencia fueron incapaces de explicar el origen de la energía solar, hasta que en los últimos años el físico Hans Bethe pudo demostrar que la energía solar es energía atómica.

Según Einstein, un trocito cualquiera de materia (un pedazo de tiza, por ejemplo) es ni más ni menos que energía concentrada. Se calcula que en un gramo de materia hay almacenada una energía atómica de unos 25 millones de kilovatios-hora.

Los astrofísicos suponen que en el centro de las estrellas, donde las presiones y las temperaturas alcanzan valores prácticamente desconocidos en la Tierra (Arturo Eddington, gran astrofísico inglés, calculó que en el centro del Sol la presión debe ser de 10^{10} atmósferas y la temperatura de 20 000 000° C), la materia puede transformarse en energía. De acuerdo con esto, como la masa del Sol es de $2{,}10^{30}$ kg, y cada gramo puede liberar 25 millones de kWh, es fácil predecir que el Sol puede tener aún una larga vida.

La luz se propaga en línea recta

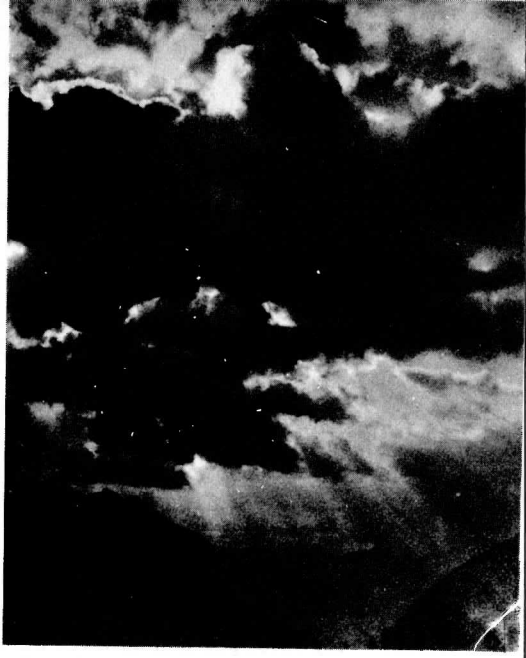
Basta observar un rayo de Sol entrando por una ventana, para advertir que la luz se propaga en línea recta. El rayo de luz se hace visible gracias a las partículas de polvo suspendidas en el aire, partículas que dispersan la luz que las ilumina.

Sin saberlo, frecuentemente usamos la propiedad de que la luz se propaga rectilíneamente. Así, por ejemplo, cuando queremos alinear tres estacas: colocamos dos, y luego ubicamos la tercera en un punto desde el cual la segunda nos impide ver la primera; sin decirlo, y tal vez sin pensarlo, estamos admitiendo que la luz que nos llega de la primera estaca se propaga en línea recta; al ser interceptada por la segunda, dejamos de ver la primera; pero si la luz no se propagara en línea recta, no bastaría con que nuestro ojo y ambas estacas estuvieran en línea recta, porque lo mismo veríamos la primera estaca gracias a los rayos de luz que se curvaran.

La velocidad de la luz

En la antigüedad se creyó que la luz se propagaba instantáneamente. Por ejemplo, si alguien encendía un fuego en lo alto de una montaña, se suponía que en el preciso instante de producida la luz ya podía ser vista por una persona que estuviera a 5 ó 10 km.

Ahora sabemos que no es así: la luz se propaga con una velocidad de 300 000 km/s; pero por veloz que sea, tarda algo en recorrer cualquier distancia.



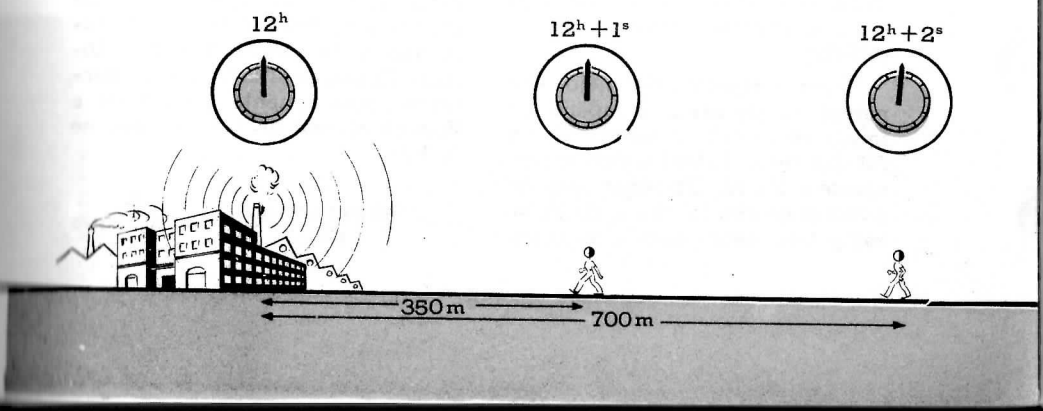
Amanecer en el San Gotardo, visto desde el valle Tesino.

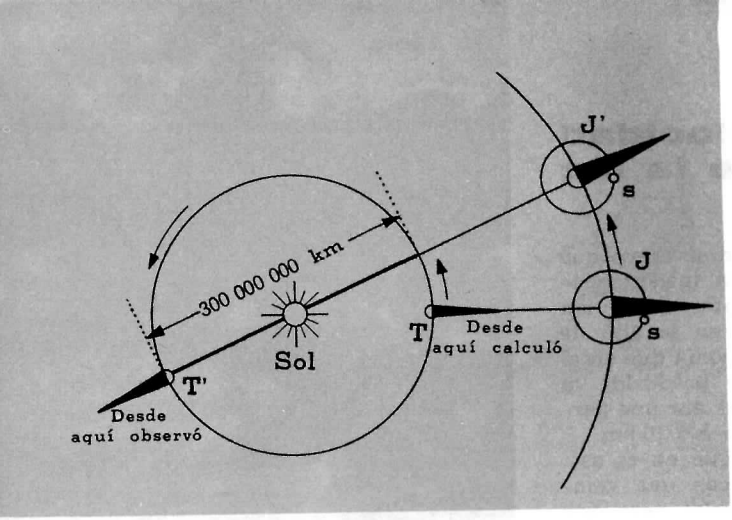
La sospecha de Galileo

Galileo fue uno de los primeros en sospechar que la luz no se propaga instantáneamente, y se propuso medir su velocidad. Su procedimiento fue muy sencillo: supongamos que dos personas se colocan en un lugar despejado, separadas por una distancia de 1 km, por ejemplo. Ambos han puesto sus relojes en hora, y han convenido en que uno de ellos encienda una luz exactamente a las 12 de la noche. Si el segundo observador viera encenderse la luz a las 12 y 2 segundos, por ejemplo, la luz habría tardado 2 segundos en recorrer los 1 000 m que los separa y su velocidad sería de 500 m/s.

Galileo realizó la experiencia, pero los relojes no indicaron ninguna diferencia entre el instante de encender la luz y el de recibirla. Entonces, ¿tenían razón los antiguos, y la propagación de la luz era instantánea? Galileo quedó perplejo, pero atribuyó el resultado negativo de su experiencia a la extraordinaria magnitud que debería tener, y que resultaba imposible medir con método tan rústico. Basta pensar que la luz recorre 1 km en sólo 0,000 003^{s}

Mientras que el primer obrero oye la sirena a las 12h y 1s, el otro la oye a las 12h y 2s. En realidad la sirena sonó a las 12.





Así se realizó la primera medición de la velocidad de la luz.

La primera medición

En 1670, por primera vez en la historia, el astrónomo danés Olaf Römer pudo calcular la velocidad de la luz. Se hallaba estudiando los eclipses de uno de los satélites de Júpiter, cuyo período había determinado tiempo atrás. Estaba, pues, en condiciones de calcular cuándo habrían de producirse los próximos eclipses. Se puso a observar uno de ellos, y con sorpresa vio que a pesar de haber llegado el instante tan cuidadosamente calculado por él, el eclipse no se producía. El satélite demoró 1 000 segundos más en desaparecer.

Asombrado, revisó cuidadosamente sus cálculos y comprobó que eran correctos. ¿Qué había sucedido?

Para comprenderlo mejor, hagamos la siguiente comparación: imaginemos que la sirena de una fábrica suena todos los días exactamente a las 12. Un señor que vive a 350 m de ella la oirá a las 12 horas y 1 segundo, pues la velocidad del sonido es de 350 m/s. Si un día este señor se encuentra a 700 m de la fábrica, no se asombrará de oír la sirena a las 12 y 2 segundos, porque *él sabe que el sonido tiene una velocidad de 350 m/s.*

Algo muy parecido sucedió a Römer con los eclipses del satélite de Júpiter. Römer había hecho todos sus cálculos basándose en observaciones realizadas cuando la Tierra y Júpiter ocupaban las posiciones que en la figura señalamos con T y J, respectivamente, pero cuando observó el retraso en el eclipse, las posiciones ocupadas por los planetas eran T' y J'. El dibujo muestra que entonces la luz debe recorrer una distancia suplementaria de 300 000 000 km, y en ello empleó los 1 000 segundos de retraso que tanto sorprendieron a Römer. Entonces el astrónomo interpretó correctamente los hechos e hizo el cálculo de la velocidad de la luz:

$$c = \frac{300\,000\,000 \text{ km}}{1\,000 \text{ s}} = 300\,000 \text{ km/s}$$

El primer método terrestre

En 1849, el físico francés Fizeau, con un método ingenioso, logró medir la velocidad de la luz con una experiencia hecha en la Tierra. Envió un rayo de luz por entre los dientes de una rueda dentada que giraba a gran velocidad, de modo que se reflejara en un espejo y volviera hacia la rueda. Si la velocidad de ésta es suficientemente grande, desde el instante en que el rayo de luz pasa hacia el espejo hasta el que llega nuevamente a la rueda, el diente que estaba al lado del espacio por donde pasó el rayo, lo habrá ocupado, y la luz no podrá pasar, de modo que si se mira el espejo a través de la rueda, no se verá la imagen de la fuente luminosa, pues los rayos reflejados no llegan hasta el observador.

Si la rueda tiene N dientes y N espacios, frente a la recta r pasan en cada vuelta $2N$ dientes y espacios; si da n vueltas por segundo, frente a r pasan en 1 seg $2Nn$ dientes y espacios, de modo que para que un diente pase a ocupar el espacio adyacente, deberá transcurrir un tiempo $2Nn$ veces menor que 1 segundo: $t = \frac{1^s}{2Nn}$. En ese mismo lapso, la luz recorre la distancia d de ida y vuelta, con lo que resulta:

$$c = \frac{2d}{t} = \frac{2d}{1:2Nn} = 4Nnd$$

Fizeau instaló el anteojo de observación, la fuente luminosa, la lámina semitransparente y la rueda dentada en la azotea de su casa, y el espejo en Montmartre, a una distancia de 8 633 m. Los datos eran $d = 8\,633$ m; $N = 720$; $n = 12{,}6$ vueltas por segundo, con lo que resulta

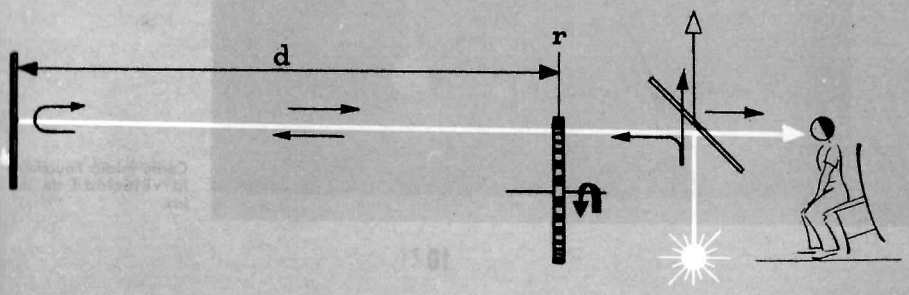
$$c = 313\,000 \text{ km/s}$$

Más adelante, otros experimentadores repitieron la experiencia de Fizeau, obteniendo siempre valores muy cercanos a los 300 000 kilómetros por segundo.

El método de Foucault

En 1850, León Foucault, y casi simultáneamente Fizeau, idearon un método que permite medir la velocidad de la luz en el reducido espacio de una habitación. La idea consiste en enviar un haz de luz sobre un espejo giratorio E, haciéndole atravesar una lámina de vidrio V, semitransparente y se-

El ingenioso dispositivo de Fizeau para medir la velocidad de la luz.



mirreflectora. Un espejo fijo M devuelve el rayo sobre E, y atraviesa luego la lámina V, observándose la mancha luminosa P en una pantalla. Cuando el espejo E gira con una velocidad angular ω suficientemente elevada, mientras el rayo va desde E hasta M, y de vuelta desde M hasta E, el espejo E ya ha girado un ángulo α, de modo que se observará el punto luminoso en P' y no en P. Se tiene entonces:

$$c = \frac{2\,\delta}{t} \qquad (1)$$

La distancia δ se mide directamente y el tiempo t se calcula mediante el ángulo α girado por el espejo, y su velocidad angular ω

$$t = \frac{\alpha}{\omega} \qquad (2)$$

Foucault midió la velocidad angular ω por la altura del sonidc producido por una sirena sobre cuyo eje estaba montado el espejo rotatorio. El ángulo α se calcula por la relación

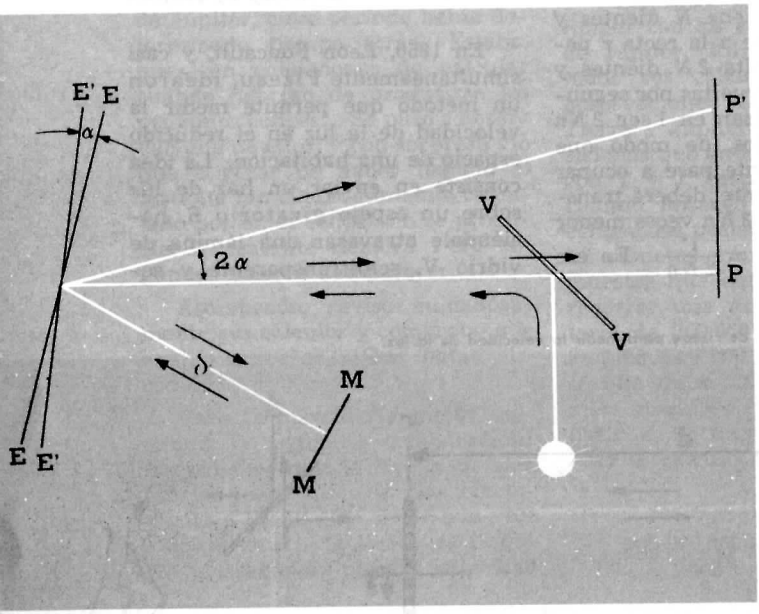
$$D \cdot 2\,\alpha = P\,P' \qquad (3)$$

De (1), (2) y (3) resulta

$$C = \frac{4\,\delta\,D\,\omega}{P\,P'}$$

En las primeras experiencias de Foucault, las cantidades medidas eran: $\delta = 1$ m; $D = 4$ m; $\omega = 1\,000$ vueltas por segundo; $P\,P' = 0{,}34$ mm, con lo que obtuvo $c = 296\,000$ km/s.

Pocos días después de haber medido la velocidad de la luz en el aire, Foucault y Fizeau midieron la velocidad de la luz en el agua, colocando un tubo lleno de ésta entre los espejos E y M, y obtuvieron así un resultado experimental que decidió la controversia en favor de la teoría ondulatoria:



Cómo midió Foucault la velocidad de la luz.

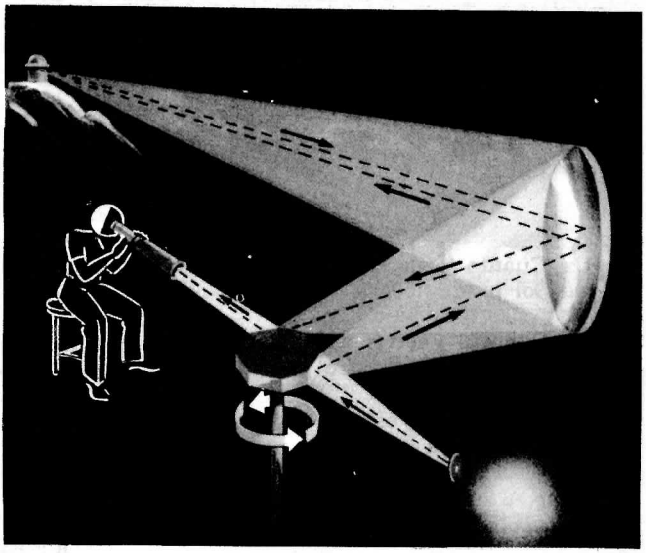
la velocidad de la luz disminuye al pasar de un medio a otro más denso.

Alberto Michelson, el hombre que dedicó su vida a medir la velocidad de la luz con precisión cada vez mayor.

Michelson, el hombre que dedicó su vida a medir la velocidad de la luz

En temas tan importantes como la velocidad de la luz, cada cifra decimal de la que se esté absolutamente seguro es todo un triunfo. Y esto solamente se logra dedicándole mucho tiempo y muchos esfuerzos.

Uno de los casos más notables es el del físico estadounidense Alberto Michelson, premio Nóbel de Física en 1913, quien dedicó su vida a medir la velocidad de la luz, con precisión cada vez mayor. Su primera medición la realizó en 1878, y la última serie en 1931, año de su muerte. Michelson empleó el método del espejo rotatorio, altamente refinado y perfeccionado por él. En sus últimas determinaciones había colocado el espejo giratorio en el Observatorio del Monte Wilson, y enviaba el haz de



Cómo midió Michelson la velocidad de la luz.

Nebulosa de Orión.

luz hasta un punto situado a unos 35 km, donde un espejo lo devolvía al espejo giratorio. También hizo mediciones haciendo recorrer al rayo luminoso alrededor de 1 500 m por el interior de un tubo en donde había hecho el vacío, para determinar la diferencia con la velocidad en el aire.

De las últimas mediciones, iniciadas por él en 1931 y concluidas por sus colaboradores Pease y Pearson, se obtiene el valor $c = 299\,774$ km/s como promedio de 2 885 mediciones.

Distancias siderales

La luz posee la mayor velocidad del universo. Sin embargo, las distancias entre las estrellas son tan grandes que la luz tarda muchísimo tiempo en recorrerlas. En llegar hasta la Tierra, emplea aproximadamente

1 segundo	desde la Luna;
8 minutos	desde el Sol;
4,6 años	desde Próxima del Centauro, la estrella más cercana;
250 000 000 años ..	desde las estrellas más lejanas.

Problemas

1. ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? La distancia Tierra-Sol es de 150 000 000 km aproximadamente.

R.: 8 minutos 20 segundos

2. ¿Cuántas vueltas a la Tierra puede dar la luz en un segundo? La circunferencia terrestre mide 40 000 km aproximadamente.

R.: 7,5 vueltas

3. La luz de la estrella más cercana –aparte del Sol– tarda unos 4 años en llegar a la Tierra. ¿A qué distancia está esa estrella?

R.: 36 000 000 000 000 km

4. Si en este mismo instante viéramos que el Sol estalla, ¿en qué instante ocurrió ese fenómeno?

R.: Hace ya 500 segundos

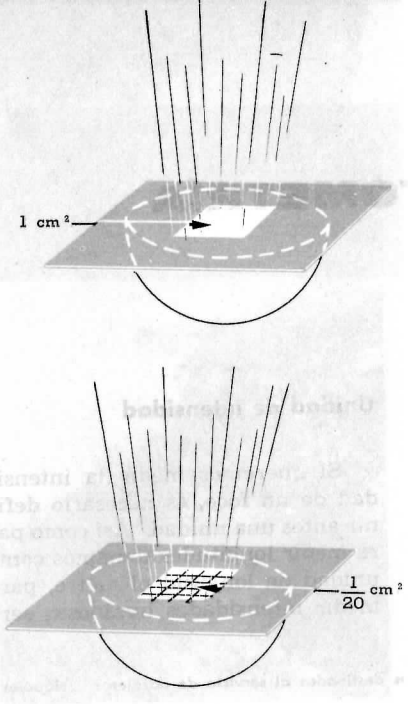
2 FOTOMETRÍA

En la vida diaria, a menudo decimos que una luz es más fuerte o más *intensa* que otra, o que una superficie está más o menos *iluminada* que otra. La rama de la óptica que trata de la medición de las intensidades de los focos de luz y las iluminaciones de las superficies se llama *fotometría.*

Unidad de intensidad

Si queremos medir la intensidad de un foco, es necesario definir antes una unidad. Así como para medir longitudes tomamos como unidad de longitud el metro, para medir intensidades luminosas será

Planta nocturna para la manutención de ómnibus destinados al servicio de pasajeros. (Nápoles.)



1 violle; 1 bujía decimal.

necesario elegir como unidad la intensidad de un foco determinado, o *patrón*.

Sabemos que si a un metal se lo calienta hasta alcanzar la temperatura de fusión, durante todo el proceso de la fusión la temperatura se mantiene constante. Y que si la temperatura se mantiene constante, también es invariable la cantidad de luz que emite. Tenemos, pues, la posibilidad de definir la unidad de intensidad empleando un metal en fusión. Pero es claro que una superficie de 1 m² de metal en fusión tiene una intensidad luminosa mucho mayor que una superficie de sólo 1 cm². Por lo tanto, para definir la unidad será necesario elegir la superficie que emite luz.

En el Congreso de Electrotécnica de 1884, *Violle* propuso como unidad la intensidad de 1 cm² de platino en fusión (a unos 1 700° C). Esa unidad fue aceptada, y se llamó *violle*. De modo que

1 violle es la intensidad luminosa de 1 cm² de platino en fusión.

El platino es fundido en un pequeño crisol, cuya tapa tiene una abertura de 1 cm².

Actualmente se usa mucho otra unidad de intensidad: *la bujía decimal*:

1 bujía decimal es la vigésima parte de 1 violle.

El símbolo de la bujía decimal es *cd**:

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{20} \text{ violle}$$

La iluminación

La iluminación de una superficie es tanto menor cuanto más alejada está del foco de luz. Éste es un hecho común, que todos conocemos, pero, ¿cómo varía la iluminación con la distancia? ¿Será inversamente proporcional a la distancia? ¿O al cuadrado, o al cubo de la distancia? Un sencillo esquema geométrico nos dará la respuesta.

* Por resolución de la Comisión de Símbolos, Unidades y Nomenclatura, de la Unión Internacional, en 1948. Son las iniciales de "candle decimal", bujía decimal en inglés.

Imaginemos un faro que lanza al espacio un haz de luz, y supongamos que a 8 km de distancia la base de ese haz es de 10 m de lado. ¿Cuál será el lado de la base a 16 km de distancia? Un sencillo razonamiento sobre triángulos semejantes nos dice que al doble de distancia, la base tiene un lado de doble longitud que a 8 km, es decir, de 20 m. Entonces, la superficie ha crecido 4 veces, pues ahora es de 400 m^2, mientras que la anterior media 100 m^2. Pero la cantidad de luz que llega al segundo cuadrado es la misma que la que llegaba al primero, de modo que la iluminación es 4 veces más pobre, porque la misma cantidad se reparte en una superficie 4 veces mayor.

Si se considera una distancia de 24 km (3 veces mayor que la inicial), la iluminación será $3^2 = 9$ veces menor; si se toma una distancia de 32 km (4 veces la inicial), la iluminación será $4^2 = 16$ veces menor que la iluminación a 8 km, etc. Luego:

1) *La iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la superficie al foco.*

Por otra parte, ¿qué sucedería si al faro se le pusiere una lámpara dos veces más intensa? Pues que la iluminación se duplicaría en todas partes; y si la lámpara fuera tres veces más intensa, se triplicaría. En otras palabras:

2) *La iluminación es directamente proporcional a la intensidad del foco.*

Estas dos conclusiones pueden ser reunidas en una sola, que constituye la definición de iluminación:

La iluminación de una superficie es directamente proporcional a la intensidad del foco e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

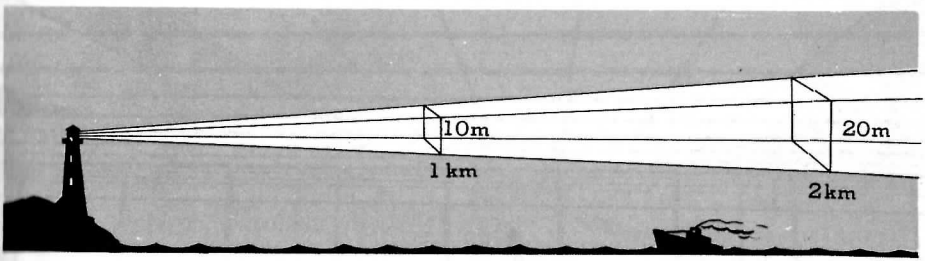
En símbolos, representando la iluminación con E:

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Unidad de iluminación

Supongamos un foco de 1 bujía decimal (1 cd) que ilumina una pantalla colocada a 1 m de distancia, de modo que los rayos son

A distancia doble, triple, cuádruple, superficies 4, 9 y 16 veces mayores; iluminaciones 4, 9 y 16 veces menores, respectivamente.



perpendiculares a la pantalla. De acuerdo con la definición de iluminación,

$$E = \frac{1}{d^2} = \frac{1\ cd}{(1\ m)^2} =$$

$$= \frac{1\ cd}{1\ m^2} = 1\ \frac{cd}{m^2} = 1\ lx$$

En este caso diremos que la superficie tiene una iluminación de *1 lux*. El *lux* es, pues, la unidad para medir iluminaciones. Su símbolo es *lx*.

EJEMPLO: *En el techo de una habitación está encendida una lámpara de 50 cd. La altura de la habitación es de 5 m. ¿Cuánto vale la iluminación del piso, en la vertical trazada desde la lámpara?*

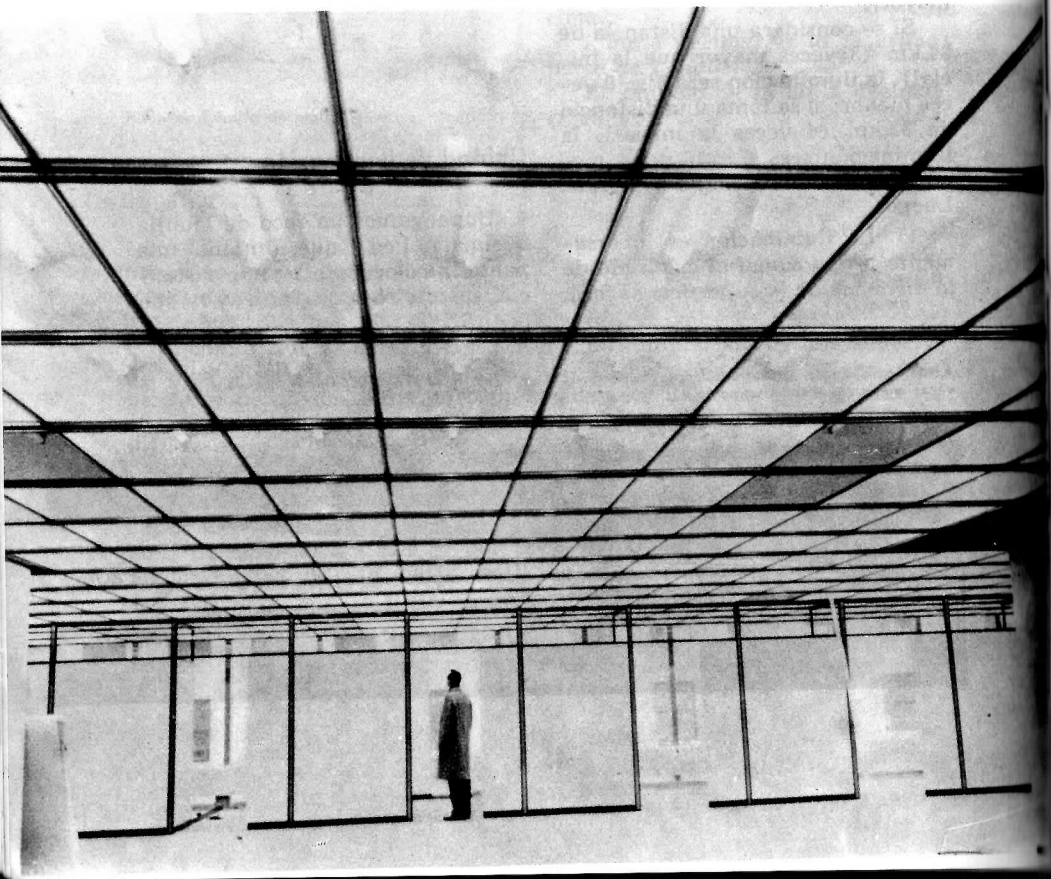
De acuerdo con la definición de iluminación:

$$E = \frac{I}{d^2} = \frac{50\ cd}{(5\ m)^2} = \frac{50\ cd}{25\ m^2} = 2\ lx$$

La iluminación del piso es, en ese punto, de 2 lx.

Si la altura de la habitación fuera de 2,5 m (la mitad de 5 m), la iluminación sería de 8 lx (4 veces mayor); si colocamos un libro a 1 m de la misma lámpara (distan-

Cielorraso iluminado con difusores de luz en plástico.



cia 5 veces menor), la iluminación será de 50 lx (25 veces mayor).

Algunos valores

Para leer cómodamente son necesarios no menos de 50 lx. En trabajos que requieran cierto esfuerzo de la vista la iluminación debe ser de unos 400 lx (una lámpara eléctrica de 100 cd a una distancia de 50 cm). En las salas de operaciones el campo debe estar iluminado con 800 lx. En las calles, la iluminación es variable, pero generalmente se halla comprendida entre 0,1 y 1 lx.

Una iluminación deficiente es tan perniciosa como una excesiva. No es conveniente, por ejemplo, leer un libro cuyas páginas estén iluminadas directamente por el sol.

Fotómetros

En la práctica ¿cómo se puede medir la intensidad de un foco luminoso? ¿cómo se mide rápidamente la iluminación?

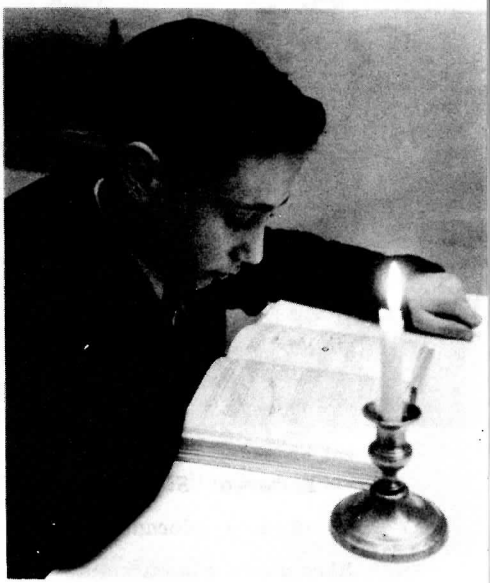
Por lo pronto, resultará relativamente fácil saber si dos lámparas tienen igual o distinta intensidad: colocadas a la misma distancia de un libro, si distinguimos las letras de éste con igual facilidad cuando ilumina una u otra lámpara, indistintamente, es indudable que ambas tienen la misma intensidad.

Pero, en general, una de las lámparas será más intensa, de modo que para leer con igual facilidad habrá que ponerse a distancias distintas. Como en ambos casos las iluminaciones son iguales, resulta:

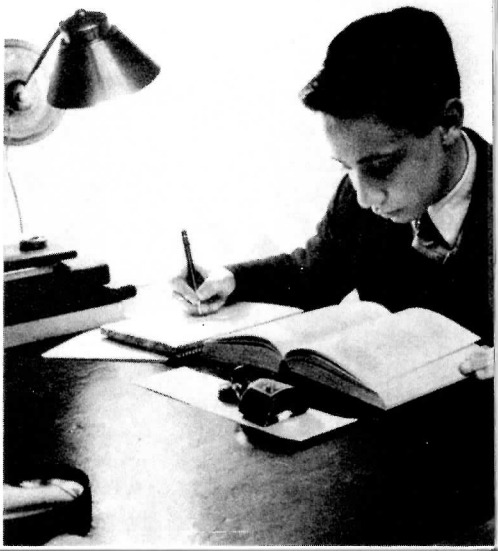
$$E = E', \quad \text{o sea:} \quad \frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2}$$

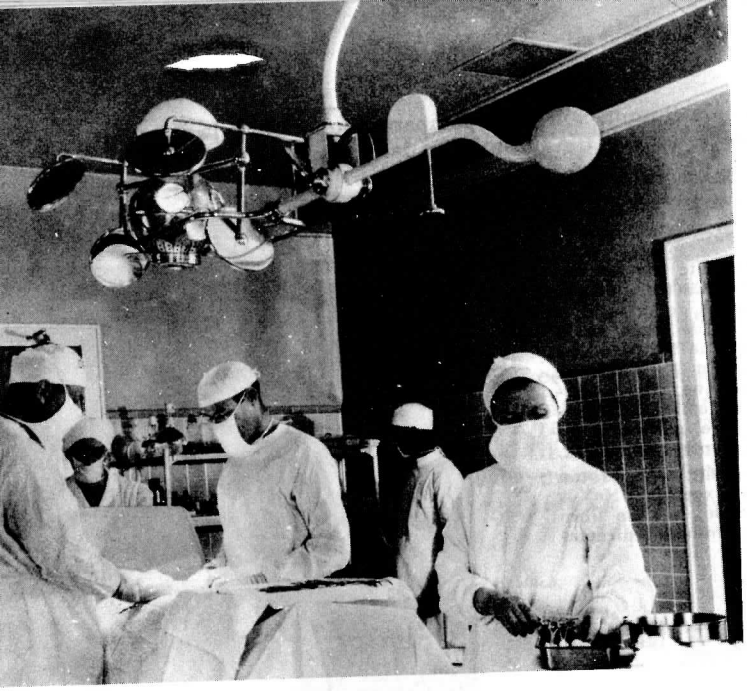
Y así, tenemos un método para calcular la intensidad de una de las lámparas, conociendo la intensidad de la otra:

$$I' = \frac{I\, d'^2}{d^2}$$



Para tener el libro siempre con la misma iluminación, hay que estar más lejos de la lámpara más intensa.





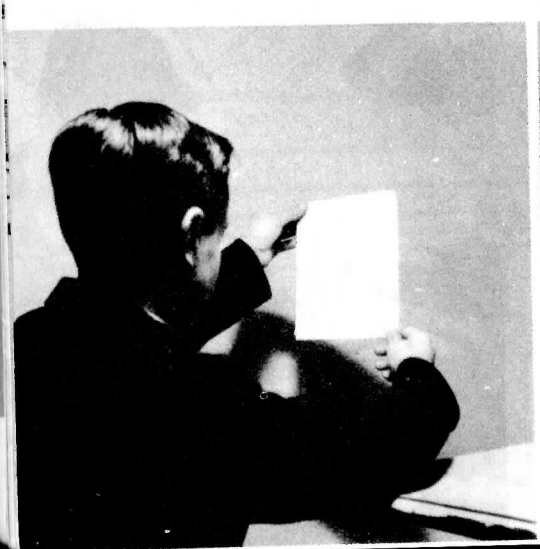
Aprontes para una intervención quirúrgica. Obsérvese el tipo de lámparas y la disposición de los espejos para lograr la perfecta iluminación del campo operatorio.

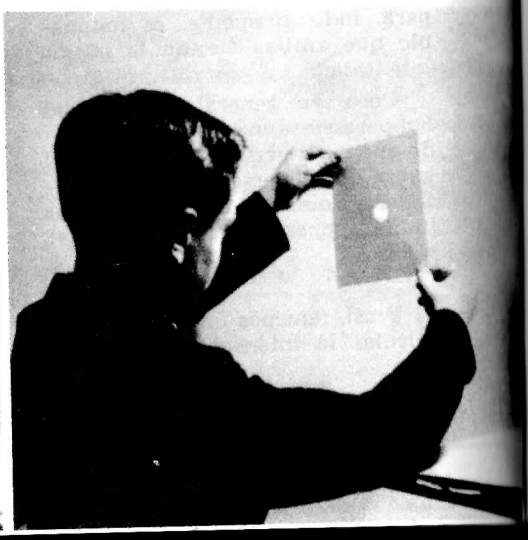
EJEMPLO: *Si una lámpara tiene 10 cd, y colocada a 1 m de un libro produce la misma iluminación que otra colocada a 2 m, ¿cuál será la intensidad de ésta?*

Aplicando la fórmula anterior.

$$I' = \frac{10\ \text{cd} \cdot (2\ \text{m})^2}{(1\ \text{m})^2} = 40\ \text{cd}$$

De esta manera podemos medir, pues, intensidades de foco. Es claro que el procedimiento es grosero, y los errores cometidos serán gran-

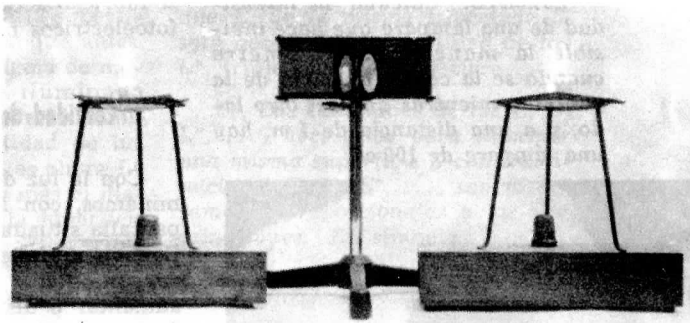




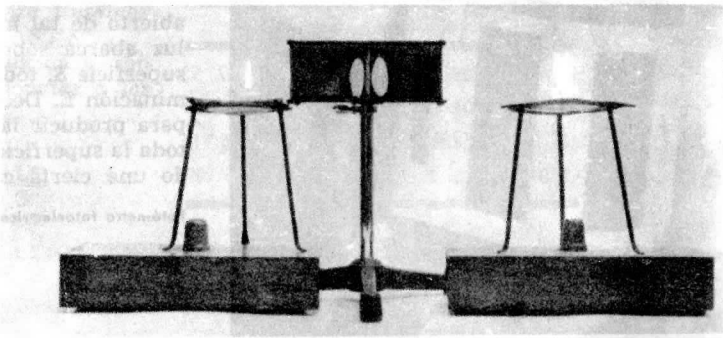
des. Técnicamente se emplean procedimientos más delicados que permiten medir con mayor precisión. Los aparatos empleados se llaman *fotómetros* (*foto* = luz; *metro* = medir). Uno de los más ingeniosos y sencillos fue inventado por Bunsen, y se lo llama *fotómetro de Bunsen*. Tratemos de comprender primero la idea de cómo fue concebido este aparato. Todos podemos efectuar en casa esta curiosa experiencia: si sobre una cartulina blanca echamos una gota de aceite, se formará una manchita; si observamos luego la cartulina a la luz de una lámpara, tal como muestra la figura, veremos que la mancha se ve más oscura que el resto; pero si la observamos a contraluz, la veremos más clara.

Podemos realizar otra experiencia interesante: si delante y detrás de la cartulina colocamos dos lámparas de igual intensidad y a la misma distancia de ésta, notaremos que la mancha no se ve. En otras palabras: *si las iluminaciones de las dos caras son iguales, la mancha no se ve.*

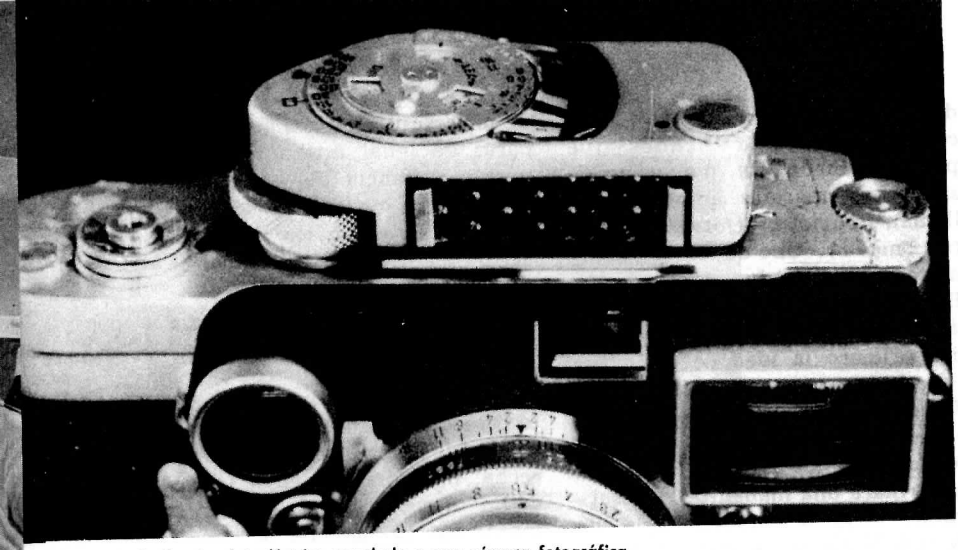
Este curioso fenómeno le dio a Bunsen la idea para construir su fotómetro: A la izquierda de una cartulina con una mancha de aceite colocó una lámpara cuya intensidad I le era conocida, y a la derecha, una lámpara cuya intensidad I' desconocía. En un primer momento la mancha se veía, y entonces movió la lámpara de la derecha, aumentando o disminuyendo su distancia a la cartulina, hasta que dejó de ver la mancha de aceite. En esa posición de las lámparas, las iluminaciones de las dos caras de la cartulina eran igua-



Las bujías no producen la misma iluminación: la mancha visible, o por lo menos se ve.



Variando las distancias convenientemente, se logra que la mancha se haga invisible, o por lo menos muy poco notable: las iluminaciones son iguales.



Fotómetro fotoeléctrico acoplado a una cámara fotográfica.

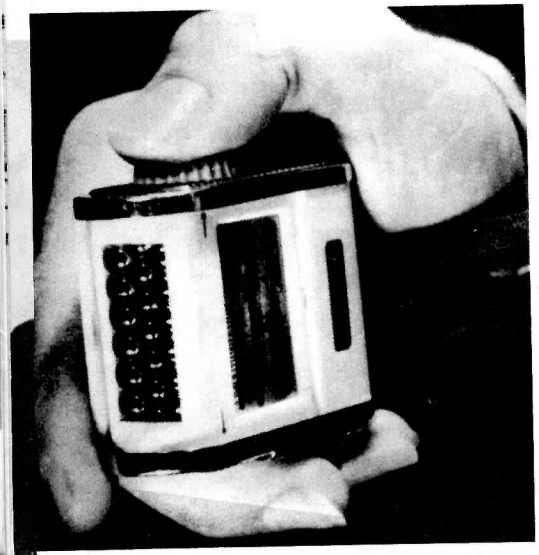
les, y, de acuerdo con lo que hemos visto, se puede calcular la intensidad desconocida I', aplicando la fórmula:

$$I' = \frac{I\,d'^2}{d^2}$$

EJEMPLO: *Calcular la intensidad de una lámpara que hace invisible la mancha del fotómetro cuando se la coloca a 0,50 m de la pantalla, mientras que del otro lado, y a una distancia de 1 m, hay una lámpara de 100 cd.*

$$I = \frac{100\ \text{cd} \cdot (0{,}5\ \text{m})^2}{(1\ \text{m})^2} = \frac{100\ \text{cd} \cdot 0{,}25\ \text{m}^2}{1\ \text{m}^2} = 25\ \text{cd}$$

Utilizando células fotoeléctricas se fabrican actualmente fotómetros fotoeléctricos muy sensibles.

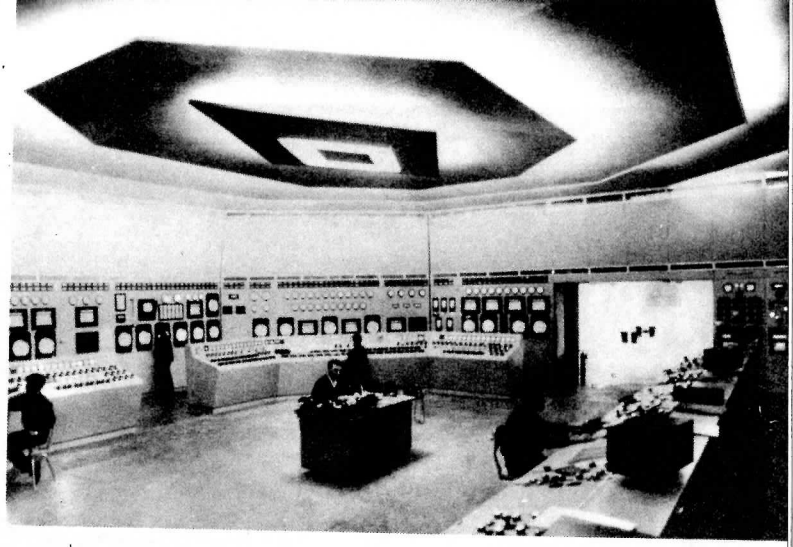


Fotómetro fotoeléctrico.

Cantidad de luz o flujo luminoso

Con la luz de una lámpara iluminamos, con iluminación E, una pantalla situada a una distancia d. Con un diafragma que abrimos o cerramos a voluntad podemos aumentar o disminuir la cantidad de luz que llega a la pantalla.

Comenzamos con el diafragma abierto de tal modo que el haz de luz abarca sobre la pantalla una superficie S, toda ella con una iluminación E. Decimos entonces que para producir la iluminación E en toda la superficie S hemos empleado una cierta cantidad de luz L.



Iluminación difusa de la sala de control automático de la usina Tiseo, en Sicilia, Italia.

Si abrimos el diafragma, llegan a la pantalla rayos de luz que antes no llegaban, por impedírselo el diafragma. Claro que como no van a incidir sobre la superficie *S*, sino sobre una parte de la pantalla que antes estaba a oscuras, la iluminación no ha aumentado, sino que simplemente ahora la superficie iluminada es mayor que antes. Si graduamos el diafragma de modo que la superficie iluminada ahora, *S'*, sea el *doble* de la iluminada antes, *S*, la cantidad de luz que llega a la pantalla es ahora *L'*, doble de *L*. Si se abre más el diafragma, de modo que la superficie con iluminación *E* sea *S''*, el triple de *S*, la cantidad de luz que llega a la pantalla es ahora *L''*, triple de *L*. Es decir que:

1) *Las cantidades de luz L, L'. L'', ..., necesarias para iluminar distintas superficies S, S', S'', ..., con una misma iluminación E, son directamente proporcionales a las superficies.*

En símbolos:

$$\frac{L}{S} = \frac{L'}{S'} = \frac{L''}{S''}$$

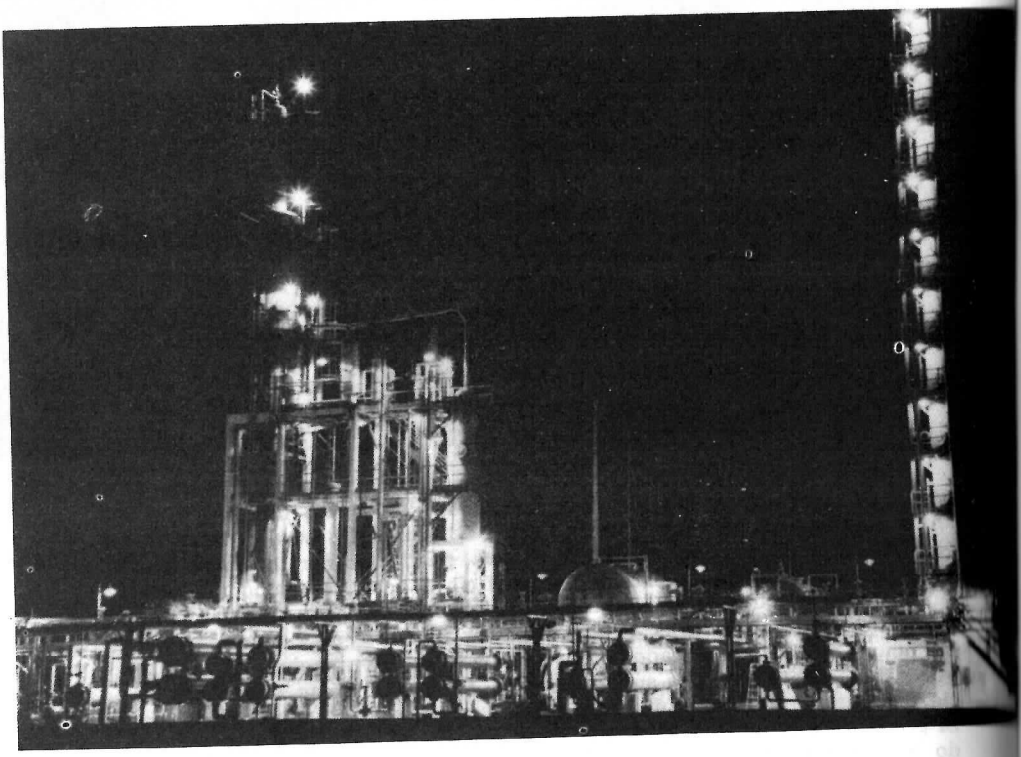
Por otra parte, si para iluminar una superficie con una iluminación *E* se necesita una cantidad de luz *L*, para iluminar *la misma* superficie *S* con iluminación *E'*, doble de *E*, se necesita una cantidad de luz *L'*, doble de *L*; y si se pretende una iluminación *E''*, triple que *E*, de *la misma* superficie *S*, será necesaria una cantidad de luz *L''*, triple que *L*. Es decir:

2) *Las cantidades de luz L, L', L'', ..., necesarias para iluminar una misma superficie S con iluminaciones E, E', E'', ..., son directamente proporcionales a las iluminaciones.* En símbolos:

$$\frac{L}{E} = \frac{L'}{E'} = \frac{L''}{E''}$$

Reuniendo en una sola las dos conclusiones anteriores:

La cantidad de luz L necesaria para iluminar una superficie S con una iluminación E, es directamente proporcional a la iluminación y a la superficie



Iluminación nocturna de la destilería de petróleo de la Esso S. A. P. A., en Campana.

En símbolos:

$$L = E.S$$

Esta igualdad es la definición de cantidad de luz.

DEFINICIÓN: *Se llama cantidad de luz recibida por una superficie, al producto de la superficie por su iluminación.*

Unidad de cantidad de luz, o flujo luminoso: *el lumen.*

1 lumen es la cantidad de luz necesaria para iluminar una superficie de 1 m² con una iluminación de 1 lux.

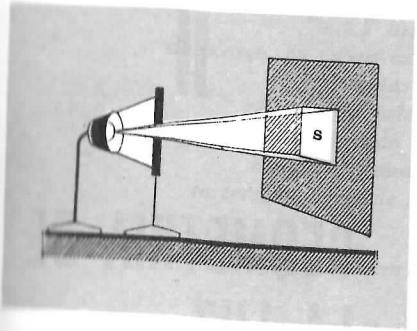
En símbolos:

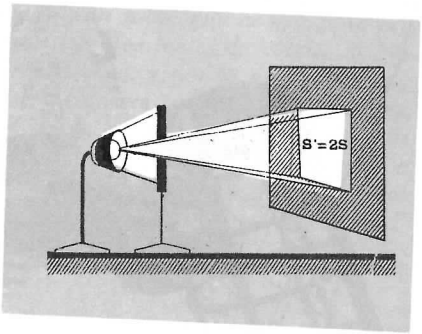
$$1\ lm = 1\ m^2 \cdot 1\ lx$$

EJEMPLO: *¿Cuántos lúmenes debe emitir una lámpara para iluminar con 500 lx una superficie de 900 cm²?* (Admitimos que toda la luz que sale de la lámpara está destinada a iluminar esa superficie de 900 cm²).

$$L = E \cdot S = 500\ lx \cdot 0{,}0900\ m^2 = 45\ lm$$

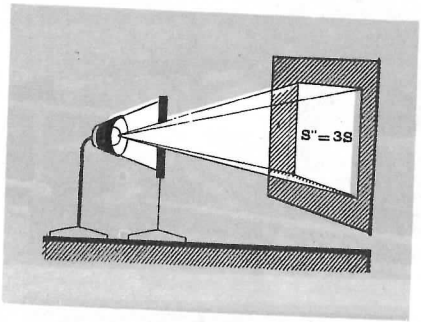
En este problema hemos supuesto que toda la luz emitida por la lámpara incide sobre la super-





Las cantidades de luz necesarias para producir una misma iluminación son directamente proporcionales a las superficies iluminadas.

ficie iluminada. En realidad, la mitad de la cantidad de luz emitida va hacia un semiespacio, y la otra mitad, hacia el semiespacio opuesto. Las pantallas se usan precisamente para aprovechar, por lo menos parte de la luz que se va hacia el semiespacio opuesto a aquél que contiene la superficie por iluminar. Con ello se consigue (naturalmente que esto depende de la pantalla) que alrededor de un 20 % sea reflejado por la pantalla en la dirección requerida.



Problemas

1. Saturno está 10 veces más lejos del Sol que la Tierra. ¿Cuántas veces menos iluminado que la Tierra está Saturno?

R.: 100 veces

2. Una lámpara de 20 cd está a 4 m de una pared, a 6 m de otra y a 3 m del piso. ¿Qué iluminación recibe cada una de esas superficies?

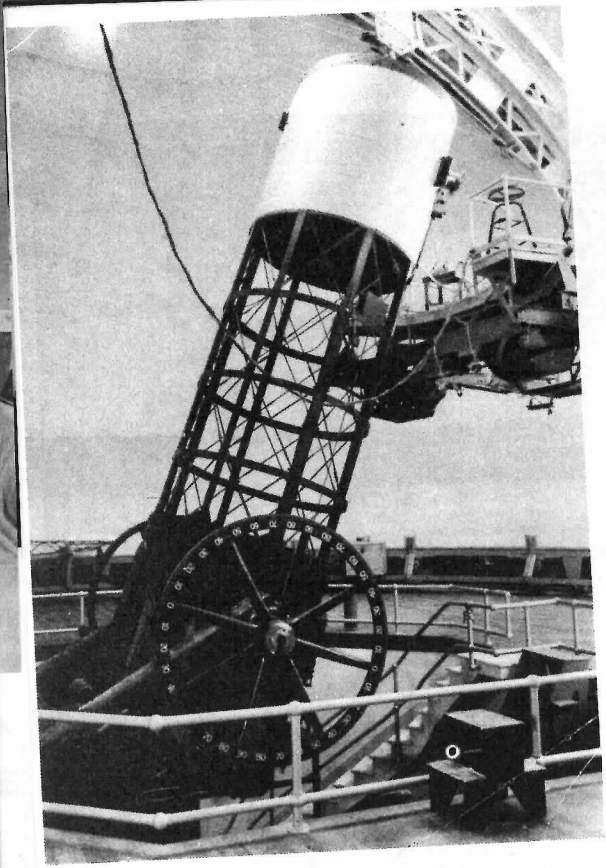
R.: 1,25 lx; 0,56 lx; 5 lx

3. Una lámpara de 20 cd está a 60 cm de una pantalla. ¿A qué distancia de la pantalla debemos colocar una lámpara de 80 cd para que la ilumine igual?

R.: 1,2 m

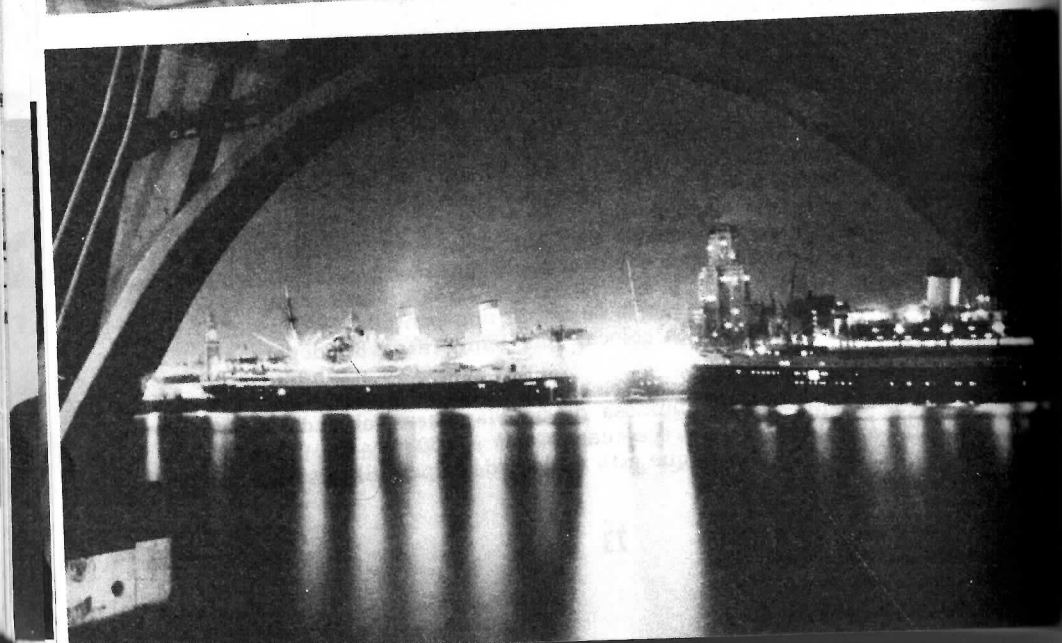
4. Hallar la intensidad luminosa de una lámpara, sabiendo que la mancha del fotómetro desaparece cuando está a 0,30 m y que la intensidad luminosa del otro foco, que está a 60 cm de la pantalla, es de 30 cd.

R.: 7,5 cd



II

GEOMETRÍA DE LA LUZ



"... Y así aparejé un tubo, que al principio era de plomo, en cuyos extremos fijé dos lentes de vidrio, ambas planas por una cara, y por la otra esférica y cóncava la primera, y convexa la segunda. Entonces, acercando un ojo a la lente cóncava, vi los objetos bastante grandes y cercanos, porque parecían estar a la tercera parte de su distancia y ser nueve veces mayores que mirados a simple vista."

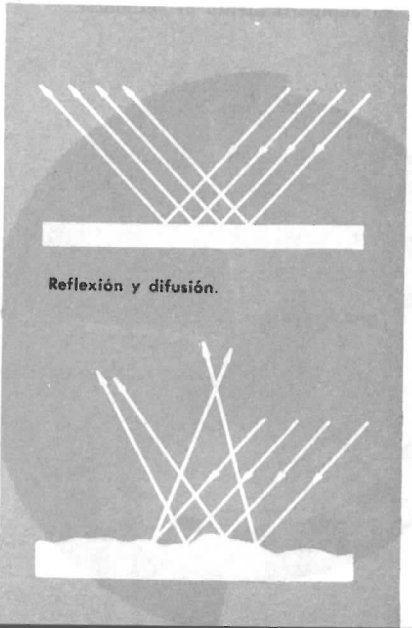
(De *El Mensajero Sideral*, por GALILEO GALILEI, Venecia, 1610.)

3 LA REFLEXIÓN DE LA LUZ

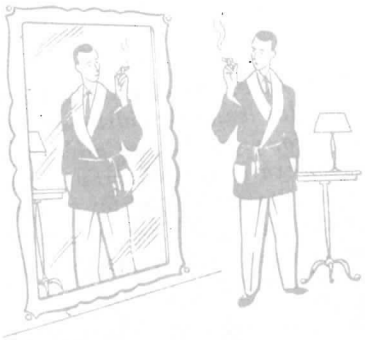
Reflexión y difusión

Cuando un haz de rayos de luz paralelos incide sobre una superficie plana bien pulida, los rayos siguen siendo paralelos después del choque con la superficie: la luz se ha *reflejado*. En cambio, cuando el haz incide sobre una superficie rugosa, después del choque los rayos no siguen siendo paralelos: la luz se ha *difundido*.

Toda superficie donde los rayos de luz se reflejan constituye un *espejo*. Por ejemplo, las aguas tranquilas de un lago, una lámina de metal o un vidrio pulidos. Los espejos pueden ser *planos* o *curvos*.



Reflexión y difusión.



La imagen no es igual al objeto; sólo es simétrica.

Las leyes de la reflexión

Las imágenes

Si un mago pudiese hacer salir de un espejo la imagen de un hombre, veríamos cosas muy raras: así, por ejemplo, si el "hombre real" escribe con la derecha, el "hombre del espejo" escribiría con la izquierda, con igual velocidad y corrección, aunque su letra sería invertida, tal como la que aparece en un secante.

Otra cosa notable del familiar espejo es que si nos miramos en él, la cara que vemos no es *igual* a la nuestra, pues si nos peinamos con raya a la izquierda, la cara que vemos en el espejo está peinada con raya a la derecha. La cara de la imagen es *simétrica* de la nuestra.

¿Cómo explicar las imágenes? Realicemos algunas experiencias con rayos luminosos, a fin de conocer las leyes de su comportamiento al reflejarse.

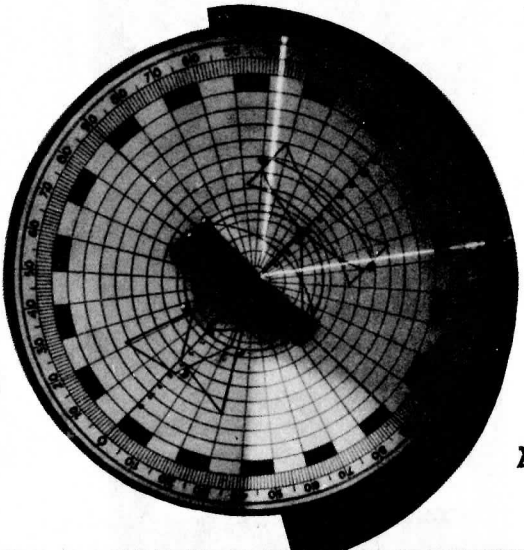
El disco de Hartl es un círculo sobre el cual se ha pegado un papel blanco, y cuyo borde está graduado. Desde uno de los costados, se hace llegar luz rozando la superficie; al iluminar el papel, los rayos se hacen fácilmente visibles.

Coloquemos un espejito perpendicularmente al plano del disco, de modo que su superficie pase por el centro del disco y hagamos llegar al espejo un rayo de luz al que llamaremos *rayo incidente*; luego de la reflexión, el rayo se llama *rayo reflejado*. El punto del espejo donde se produce la incidencia se llama *punto de incidencia*; la recta perpendicular al plano del espejo en el punto de incidencia, es la *normal*; el ángulo formado por el rayo incidente con la normal se llama *ángulo de incidencia*, y el formado por el rayo reflejado con la normal, *ángulo de reflexión*.

Como el plano del espejo es perpendicular al plano del disco, la normal está contenida en este último, y se observa que también el rayo reflejado está en el plano del disco. Se puede decir, pues:

PRIMERA LEY. *El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en un mismo plano, perpendicular al espejo, llamado plano de la reflexión.*

También se observa, y para eso está graduada la periferia del disco, que siempre, sea cual fuere el valor del ángulo de incidencia, se cumple:



Las leyes de la reflexión.

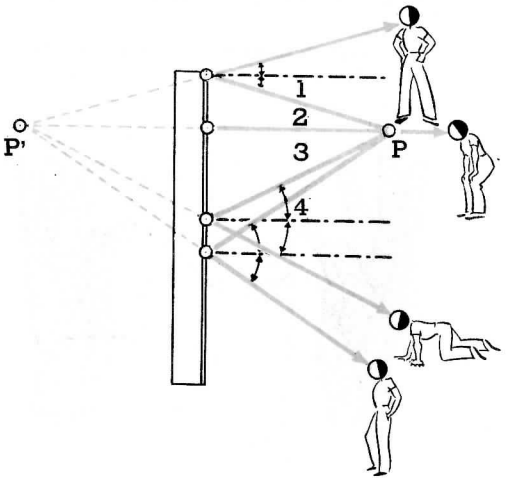
Enseñanza de sordomudos por medio de espejos.

SEGUNDA LEY. *El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.*

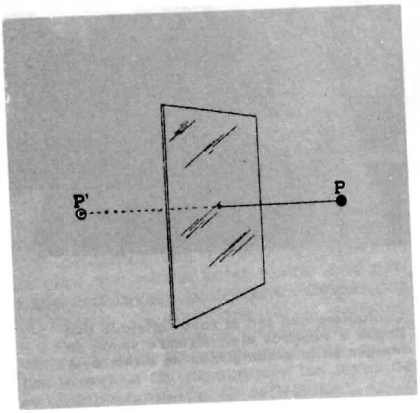
Cualquiera que sea el rayo reflejado que llegue a nuestros ojos, siempre vemos la imagen en la prolongación de dicho rayo.

Espejos planos

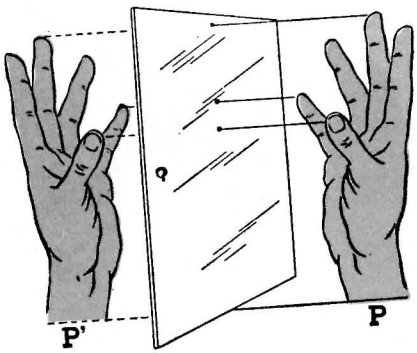
Las dos leyes de la reflexión permiten explicar las características de las imágenes. Si de un punto *P* sale un rayo luminoso que se refleja y llega a nuestros ojos, veremos la imagen de *P* del otro lado del espejo, en la prolongación del rayo reflejado; si variamos nuestra posición, nos llegará otro rayo reflejado, pero seguiremos viendo la imagen en la prolongación del nuevo rayo. Es decir que



P' (la imagen de P) está ubicada en la intersección de las prolongaciones de *todos* los rayos reflejados. En realidad en el punto P' no hay nada, pero mirando al espejo *tenemos la sensación* de que en ese lugar está el punto P. Esto sucede porque, para el ojo, la luz ha partido de P', pues él "ignora" el cambio de dirección que ha sufrido al reflejarse en el espejo. Es algo así como cuando un amigo se coloca detrás nuestro y a la derecha, sin que lo veamos, y nos llama la atención tocándonos en el hombro izquierdo: indudablemente, miraremos hacia nuestra izquierda, y en seguida de advertir que allí no hay nadie, buscaremos al causante por la derecha. De la misma manera, el ojo que recibe un rayo de luz ve el objeto del cual ha partido el rayo en la prolongación del rayo que le llega; si la luz viene directamente, ve el objeto mismo, y si la luz ha sufrido una desviación, ve la imagen.



La imagen es simétrica del objeto con respecto al plano del espejo.

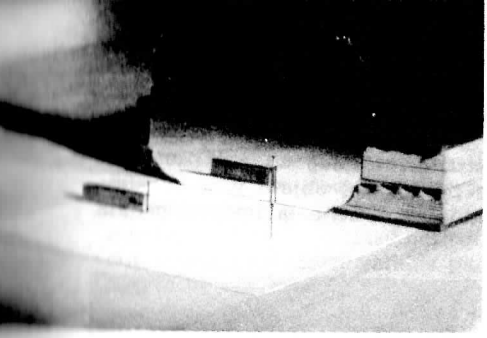


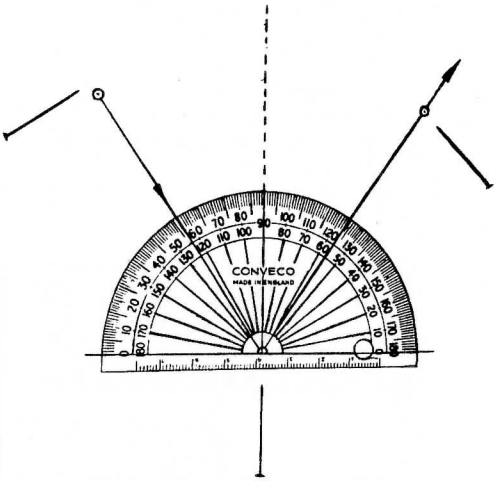
Cuando la imagen está ubicada en la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados, se la llama *imagen virtual*, porque no son los rayos reflejados los que realmente se cortan, sino tan sólo sus prolongaciones. De modo que una imagen virtual es algo así como una ilusión óptica, pues donde la vemos no hay nada.

Imagen virtual

DEFINICIÓN: Se llama imagen virtual de un punto objeto, al punto de *intersección de las prolongaciones* de todos los rayos reflejados, correspondientes a rayos que han partido del punto objeto.

Del esquema se deduce que el objeto P y su imagen P' son simétricos respecto del plano del espejo. Si se trata de una figura y no de un punto, cada uno de los puntos de la imagen es simétrico, con respecto al plano del espejo, del correspondiente punto de la figura. Esto explica lo que habíamos dicho al comienzo: que objeto e imagen no son iguales, sino simétricos.





Una experiencia casera para comprobar las leyes de la reflexión.

EXPERIENCIA CASERA. Sobre una mesa colóquese una hoja de papel, y perpendicularmente a su plano, un espejo. En un punto cualquiera de la hoja, frente al espejo, clávese un alfiler; clávese otro alfiler tocando el espejo. Por último, clávese un tercer alfiler de modo que se vea alineado con el que está junto al espejo y con la imagen del primero.

Trácense la intersección del espejo con el papel, y en el punto de incidencia la normal a esa recta. Se podrá comprobar así que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, y que objeto e imagen son simétricos respecto del plano del espejo.

Problemas de aplicación

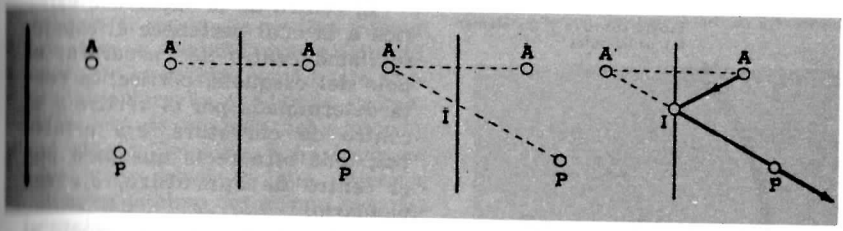
1. *Hallar la imagen del punto A*

Basta construir *A'* simétrico de *A* con respecto al plano del espejo.

2. *Dado el rayo A I, construir el rayo reflejado.*

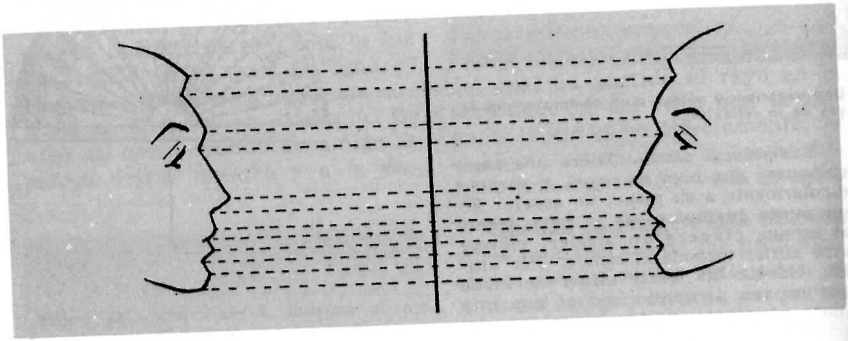
Se trazan la normal al espejo en el punto de incidencia, y la semirrecta que forma con ella un ángulo igual al de incidencia.

3. *Dado un punto A, un espejo y un punto P, construir el rayo que parte de A, y al reflejarse pasa por P.*

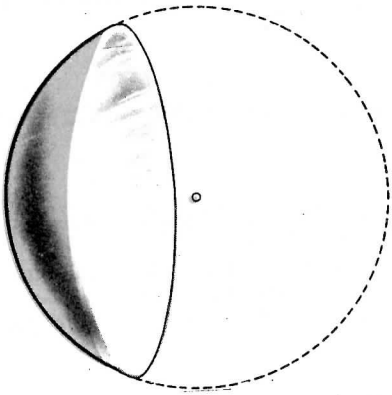


Se construye *A'*, imagen de *A*; *A'* y *P* determinan una recta que corta al espejo en *I*. El rayo *A I* y el *I P* constituyen la solución.

4. *Dado el segmento A B y el espejo E, construir su imagen.*
Es el segmento *A' B'*, determinado por las imágenes de *A* y de *B*.
5. *Dada una figura cualquiera, construir su imagen.*
Se toma un número suficiente de puntos del objeto y se construyen sus imágenes; uniendo estos puntos se obtiene la imagen pedida.



Espejos esféricos



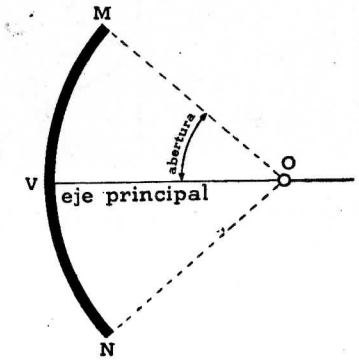
Espejo cóncavo y sus elementos principales.

Un espejo esférico es un casquete esférico pulido. Si está pulido en la parte interior, es cóncavo, y convexo en el caso contrario.

Elementos principales

El centro de la superficie esférica a la cual pertenece el espejo, se llama *centro de curvatura*; el polo del casquete, *vértice*; la recta determinada por el vértice y el centro de curvatura, *eje principal*; toda otra recta que pase por el centro de curvatura, *eje secundario*.

Se llama *abertura* del espejo al ángulo formado por el eje principal con un radio que, como los de



la figura, pasan por el borde del espejo. Nos limitaremos a estudiar espejos de pequeña abertura, no mayor de unos 10°, pues muchas de las conclusiones que obtengamos no serán válidas para aberturas mayores.

Espejos cóncavos

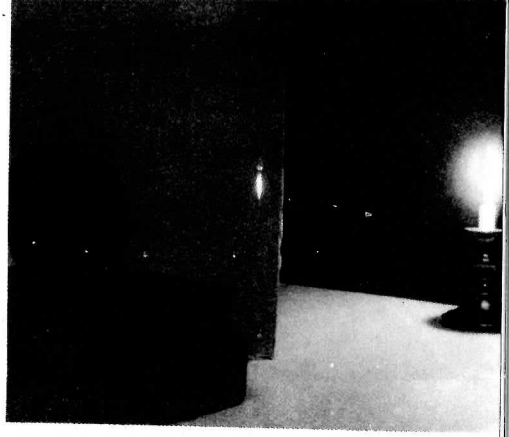
Con un espejo cóncavo se obtiene una gran variedad de imágenes, como se ve en las ilustraciones. Si el objeto (la vela) se coloca lejos del espejo, en la pantalla se obtiene una imagen más pequeña que el objeto con la particularidad de que está invertida.

Si acercamos el objeto al espejo, la imagen se forma más lejos y su tamaño aumenta, tanto más cuanto más cerca esté el objeto del espejo, hasta que colocado el objeto a cierta distancia, se observa que la imagen está a esa misma distancia del espejo y que su tamaño es igual al del objeto.

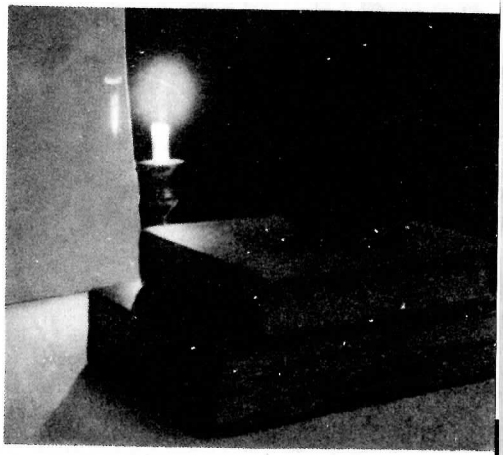
Aproximando aún más el objeto al espejo, la imagen se aleja y su tamaño es mayor, y si se lo sigue aproximando, se encontrará una posición del objeto para la cual no se obtiene ninguna imagen.

Si todavía se acerca más el objeto al espejo, se ve una imagen de mayor tamaño que el objeto, pero no invertida, como hasta ahora, sino derecha, y además, la imagen está de un lado del espejo, y el objeto, del otro, y no como en los otros casos, en que objeto e imagen estaban del mismo lado del espejo.

Por otra parte, si sobre el espejo se hace incidir un haz de rayos de sol paralelos al eje principal,

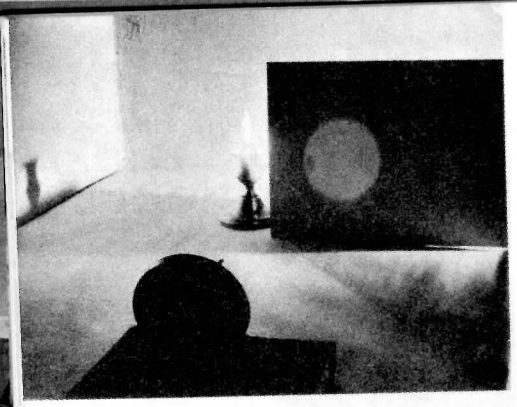


Objeto lejos del espejo: imagen invertida, más pequeña y cerca del espejo.

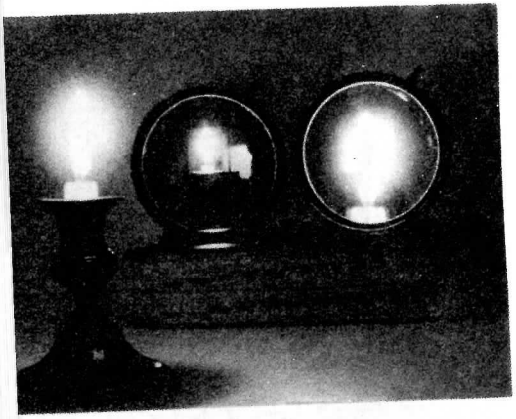


Objeto más próximo: imagen invertida, del mismo tamaño y a la misma distancia del espejo.

Objeto próximo: imagen invertida, más grande y alejada del espejo.

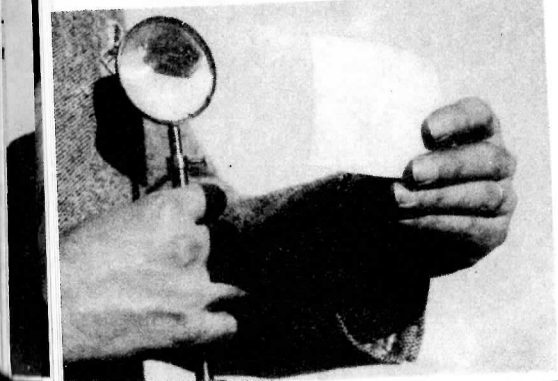


Objeto en el foco: no se obtiene imagen, pues todos los rayos salen paralelos al eje principal.



Objeto muy próximo: imagen derecha, más grande y del otro lado del espejo (virtual). El espejo de la izquierda es convexo.

Abajo): Con un espejo cóncavo expuesto a los rayos del sol se puede quemar un papel.



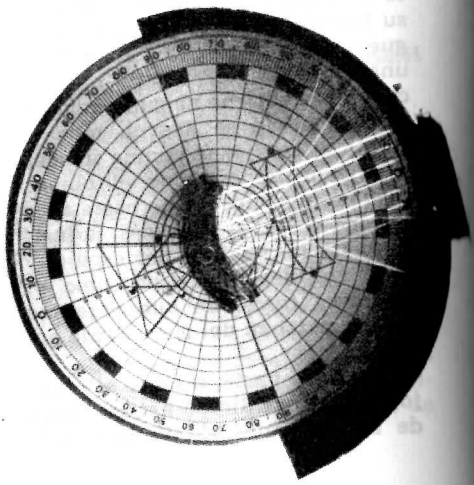
luego de la reflexión en el espejo, los rayos convergen todos en un mismo punto del eje principal, llamado *foco principal*. Por eso también se llaman *convergentes* los espejos cóncavos.

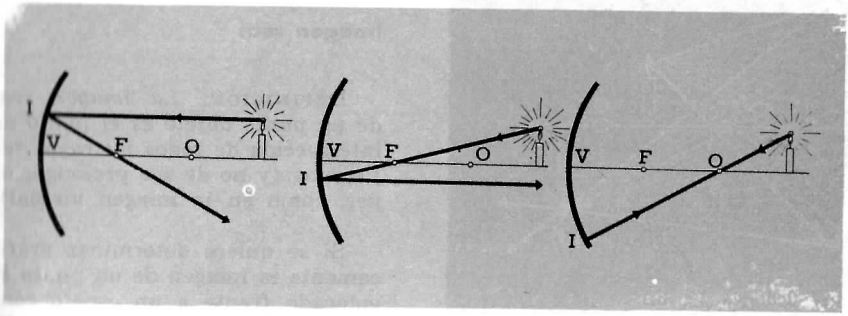
Los rayos principales

Para explicar las distintas imágenes recurrimos al disco de Hartl, para averiguar el comportamiento de los rayos reflejados. Si se hace incidir un haz de rayos paralelos al eje principal, todos los rayos reflejados cortan al eje en un mismo punto: el *foco principal*. Comprobamos que:

1) *Todo rayo paralelo al eje principal, al reflejarse pasa por el foco.*

Todos los rayos que inciden en el espejo paralelamente al eje principal, se reflejan y pasan por un mismo punto: el foco.





2) *Todo rayo incidente que pase por el foco, se refleja paralelo al eje principal.*

Además:

3) *Todo rayo incidente que pase por el centro de curvatura, se refleja sobre sí mismo.* Esto es natural, pues por pasar por el centro de curvatura coincide con un radio, y por ello es perpendicular a la superficie esférica.

Estos tres rayos, llamados *rayos principales*, son muy útiles para construir la imagen de un objeto, pues se sabe de antemano el camino que han de seguir después de reflejarse.

La posición del foco

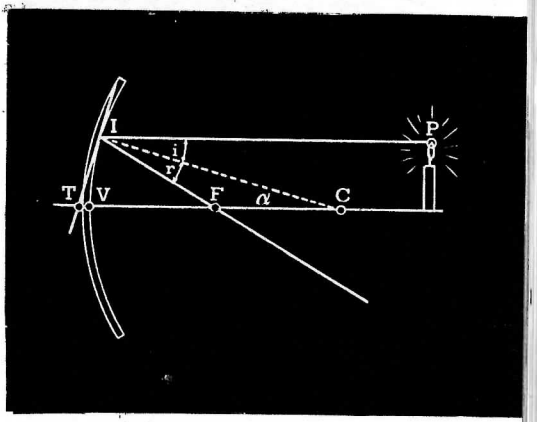
Se puede demostrar geométricamente, y se verifica experimentalmente, que el foco es, muy aproximadamente, el punto medio del segmento determinado por el centro de curvatura y el vértice del espejo. Es decir:

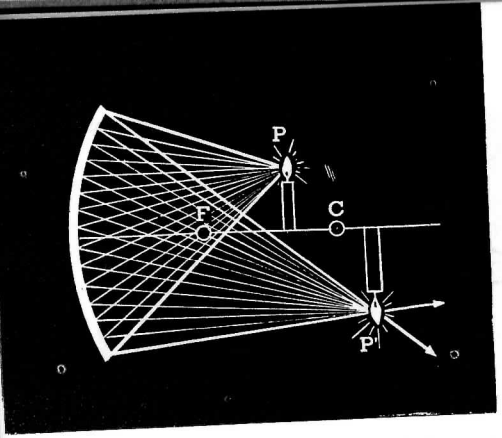
La distancia focal es la mitad del radio.

¿Qué es la imagen de un objeto?

Sea el punto *P* frente a un espejo cóncavo. Todos los rayos que salen de *P* e inciden sobre el espejo, al reflejarse concurren en *P'*, la imagen de *P*. En este caso se llama *imagen real*, pues son realmente los mismos rayos reflejados (y no sus prolongaciones) los que la forman.

El foco es el punto medio entre el vértice del espejo y su centro de curvatura.





Todos los rayos reflejados en el espejo, y que han salido del punto objeto, todos sin excepción, pasan por la imagen y contribuyen a formarla.

Imagen real

DEFINICIÓN: *La imagen real de un punto objeto es el punto de intersección de todos los rayos reflejados* (y no de sus prolongaciones, como en la imagen virtual).

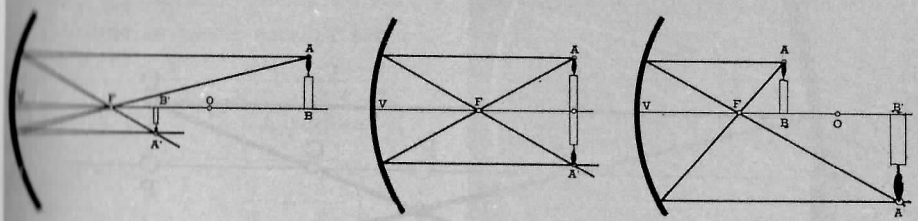
Si se quiere determinar gráficamente la imagen de un punto P, colocado frente a un espejo cóncavo de distancia focal conocida, bastará determinar el punto de intersección de sólo dos de los rayos reflejados, pues por definición de imagen, todos los demás pasarán por él. De entre todos los rayos que parten del objeto, elegimos dos, cuyo camino después de reflejados conocemos de antemano, es decir, dos de los rayos principales.

Construcción de los distintos casos de imágenes

1) *El objeto está más allá del centro de curvatura.* Como muestra la figura, dos de los tres rayos principales bastan para determinar la imagen, que es real, invertida y menor que el objeto. Si se quiere trazar el rayo reflejado correspondiente a un rayo incidente cualquiera, basta trazar la semirrecta determinada por el punto de incidencia con el punto imagen (por definición de imagen real).

2) *El objeto está sobre el centro de curvatura.* Trabajando con los rayos principales se obtiene la imagen, que es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto.

El espejo cóncavo forma una imagen virtual mayor que el objeto, cuando éste está colocado entre el espejo y el foco.



Construcción de la imagen mediante los rayos principales.

En este caso se evidencia la necesidad de considerar espejos de pequeña abertura. Hágase la construcción con un espejo de abertura grande, y se comprobará que los tres rayos reflejados principales no se cortan en un mismo punto.

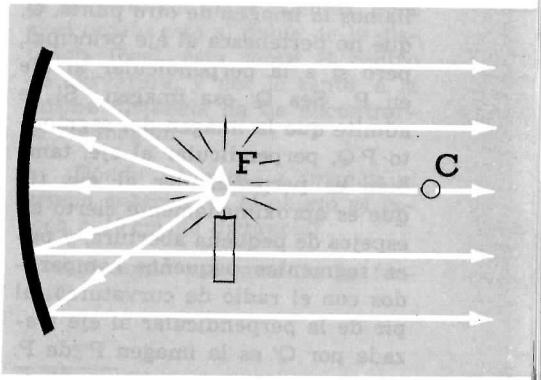
3) *El objeto está entre el centro de curvatura y el foco.* La imagen resulta real, invertida y de tamaño mayor que el del objeto.

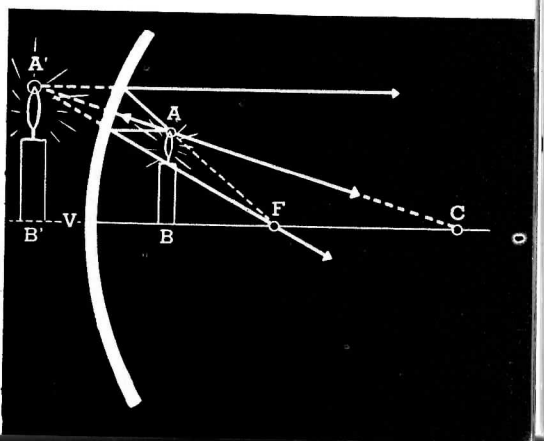
4) *El objeto está sobre el foco.* Los rayos reflejados no se cortan, lo que significa que no hay imagen. (También se dice que "está en el infinito".)

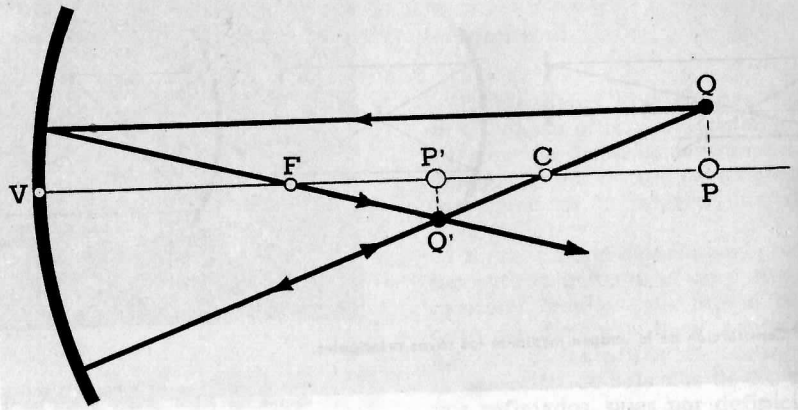
5) *El objeto está entre el foco y el espejo.* Los rayos reflejados divergen entre sí; no habrá, pues, intersección, o sea imagen real. Pero sus prolongaciones sí se cortan: la imagen es virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto.

Imagen de un punto del eje

En todos los casos anteriores hemos considerado puntos que si bien están cerca del eje principal, no pertenecen a él. Ello nos permitió usar los rayos principales para determinar su imagen. Si quisiéramos usar esos rayos para hallar la imagen de un punto, P







del eje principal, veríamos inmediatamente que no es posible. Para determinar la imagen nos valemos de un pequeño artificio: hallamos la imagen de otro punto, Q, que no pertenezca al eje principal, pero sí a la perpendicular al eje en P. Sea Q′ esa imagen. Si se admite que la imagen del segmento P Q, perpendicular al eje, también es perpendicular al eje (lo que es aproximadamente cierto en espejos de pequeña abertura, y para segmentos pequeños comparados con el radio de curvatura), el pie de la perpendicular al eje trazada por Q′ es la imagen P′ de P.

La posición de la imagen

Ya hemos visto cómo al acercar el objeto al espejo la imagen se aleja, y viceversa. ¿Qué relación hay entre las distancias de objeto e imagen con el espejo? En la figura se observa que en el triángulo PIP', $\vec{IC}$ es la bisectriz de $\hat{I}$, de modo que divide al lado PP' en segmentos proporcionales a los lados adyacentes:

$$\frac{IP'}{CP'} = \frac{IP}{CP}$$

Como sólo consideramos el caso de un espejo de pequeña abertura, aproximadamente se cumple que:

$IP' = VP' = x'$ $\qquad$ $IP = VP = x$

y como

$CP' = r - x'$ y $CP = x - r$

se tiene:

$$\frac{x'}{r - x'} = \frac{x}{x - r}$$

Como el producto de los extremos es igual al de los medios

$$x'(x - r) = x(r - x')$$

o sea:

$$x'x - x'r = xr - xx'$$

y también:

$$2xx' = r(x + x')$$

de donde:

$$\frac{2}{r} = \frac{x + x'}{xx'}$$

lo que se puede escribir así:

$$\frac{1}{r/2} = \frac{x}{x\,x'} + \frac{x'}{x\,x'}$$

Y como $r/2 = f$, resulta

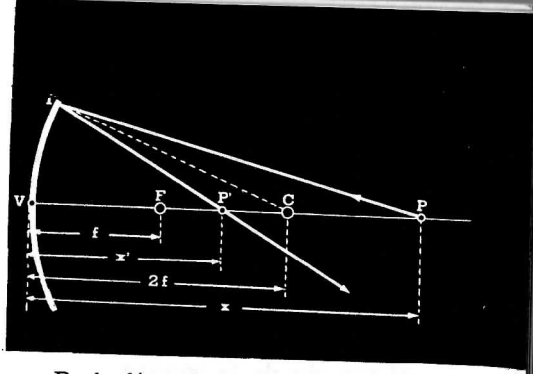
$$\boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'}}$$

A esta fórmula, que vincula las distancias de objeto e imagen con la distancia del foco al vértice (distancia focal), se la llama *fórmula de los focos conjugados* o *de Descartes*.

La fórmula de los focos conjugados nos permite saber en qué lugar estará la imagen, conociendo la distancia del objeto al espejo y su distancia focal.

Otra de las aplicaciones de la fórmula de los focos conjugados es la de determinar la distancia focal de un espejo midiendo las distancias al mismo del objeto y su imagen.

EJEMPLOS: *¿A qué distancia de un espejo de 30 cm de distancia focal deberemos colocar una pantalla, para que en ella se forme la imagen de un objeto colocado a 60 cm del espejo?*



De la fórmula de los focos conjugados resulta:

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x} =$$

$$= \frac{1}{30\text{ cm}} - \frac{1}{60\text{ cm}} =$$

$$= \frac{1}{60\text{ cm}} \therefore\ x' = 60\text{ cm}$$

Este resultado pudimos haberlo previsto sin hacer cuentas, pues si el objeto está al doble de la distancia focal, está sobre el centro de curvatura, y por lo tanto, a la misma distancia ha de encontrarse la imagen.

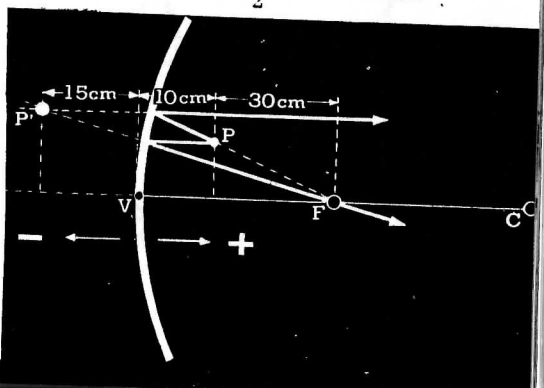
¿Dónde formará la imagen el espejo anterior, si el objeto se coloca a 10 cm de distancia?

Aplicando nuevamente la fórmula:

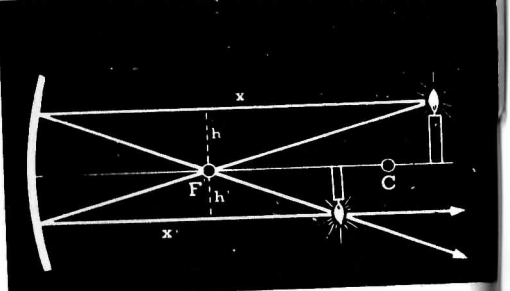
$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x} = \frac{1}{30\text{ cm}} - \frac{1}{10\text{ cm}} = -\frac{2}{30\text{ cm}} \therefore$$

$$\therefore\ x' = -\frac{30\text{ cm}}{2} = -15\text{ cm}$$

¿Qué significa este signo negativo? En primer lugar, observemos que las distancias están contadas a partir del vértice como origen; hacia la derecha son positivas, y hacia la izquierda, negativas. Por lo tanto, ese signo signi-



fica que la imagen estará a la izquierda del espejo, lo que está de acuerdo con lo que sabemos, pues si el objeto está entre el foco y el vértice, como es el caso, su imagen es virtual (del otro lado del espejo).



El tamaño de la imagen depende de la posición del objeto y de la distancia focal del espejo.

El tamaño de la imagen

LA ALTURA. De la semejanza de los triángulos señalados en la figura resulta:

$$\frac{x}{x'} = \frac{h}{h'} \therefore h' = h\,\frac{x'}{x}$$

La fórmula nos dice que la altura de la imagen es directamente proporcional a la altura del objeto, y nos confirma lo que cualitativamente ya sabíamos: que la altura es tanto mayor, cuanto mayor es la distancia de la imagen al espejo.

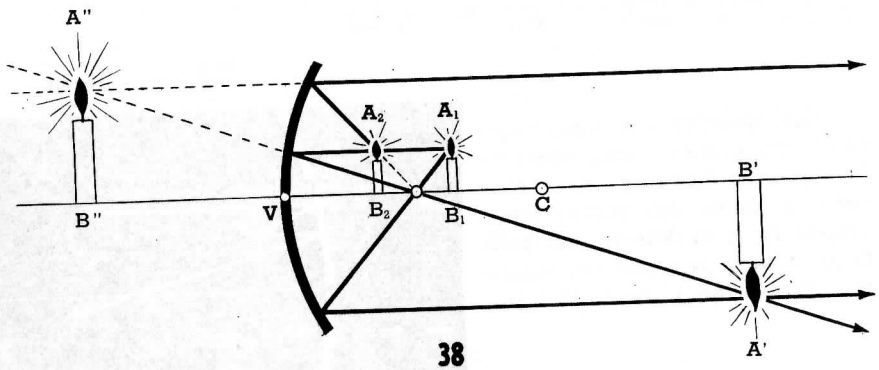
EJEMPLO: *¿A qué distancia de un espejo cóncavo de $f = 50$ cm habrá que colocar un objeto de 1 cm de altura para que su imagen tenga una altura de 3 cm?*

En la fórmula de los focos conjugados se reemplaza x' por su valor deducido de la fórmula anterior:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{1}{x} + \dfrac{1}{x'} = \dfrac{1}{f} \\ x' = x\,\dfrac{h'}{h} \end{array}\right\} \quad \therefore \frac{1}{x} + \frac{h}{x\,h'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{x}\left(1 + \frac{h}{h'}\right) = \frac{1}{f} \therefore x = f\left(1 + \frac{h}{h'}\right)$$

Si se necesita una imagen de un tamaño determinado, se la puede obtener real o bien virtual; y las posiciones en que hay que colocar el objeto son simétricas con respecto al foco.



Con los datos:

$$x = 50\text{ cm}\left(1 + \frac{1\text{ cm}}{3\text{ cm}}\right) = 50\text{ cm} \cdot \frac{4}{3} \cong 66{,}7\text{ cm}$$

En realidad, este problema tiene dos soluciones: una para imagen real, A′ B′, y otra para virtual, A″ B″. Para obtener ambas hay que atribuir un signo a las alturas de las imágenes: positivo, si la imagen y objeto están en semiplanos opuestos respecto del eje principal (imagen real), y negativo en caso contrario. Si aplicamos a este último caso la fórmula obtenida, resulta:

$$x = 50\text{ cm}\left(1 + \frac{1\text{ cm}}{-3\text{ cm}}\right) = 50\text{ cm}\left(1 - \frac{1}{3}\right) = 50\text{ cm} \cdot \frac{2}{3} = 33{,}33\text{ cm}$$

Como se ve, las posiciones del objeto $A_1 B_1$ y $A_2 B_2$, a las cuales corresponden una imagen real A′ B′ y una virtual A″ B″, ambas de alturas iguales, son simétricas respecto del foco.

Espejos convexos

Los espejos convexos sólo presentan un tipo de imagen: colóquese el objeto a la distancia que se quiera, su imagen será siempre *virtual, derecha* y de *menor* tamaño que el objeto.

Si colocamos un espejo convexo en el disco de Hartl, y hacemos incidir sobre él un haz de rayos luminosos, veremos que los rayos reflejados divergen.

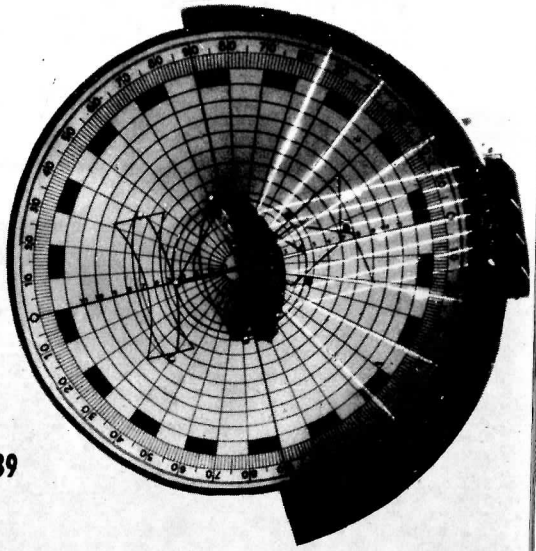
De ahí que estos espejos se llamen también *divergentes*. Pero si observamos las prolongaciones de los rayos reflejados comprobaremos que todas ellas se cortan en un mismo punto del eje principal: el foco. Claro está que, por estar formado por las prolongaciones de los rayos reflejados y no por ellos mismos, se trata de un *foco virtual*.

En forma análoga al caso de los espejos cóncavos, el disco de Hartl nos permite comprobar la existencia de tres rayos principales:

1) A todo rayo incidente paralelo al eje principal le corresponde un rayo reflejado cuya *prolongación* pasa por el foco.

2) A todo rayo incidente cuya *prolongación* pasa por el foco le corresponde un rayo reflejado paralelo al eje principal.

Todos los rayos que inciden sobre el espejo paralelamente al eje principal se reflejan y divergen entre sí, pero sus prolongaciones concurren todas en un mismo punto del eje principal: el foco, que es virtual.



3) A todo rayo incidente cuya *prolongación* pase por el centro de curvatura le corresponde un rayo reflejado que se le superpone.

Como se observa en la figura (pág. 41), los rayos principales permiten construir las imágenes, y explica por qué hay un solo tipo de ellas.

La fórmula de los focos conjugados

La fórmula de los focos conjugados también es válida para los espejos convexos, pero cabe advertir que, como el foco es virtual, *la distancia focal es negativa.*

EJEMPLOS: *A 60 cm de un espejo convexo de distancia focal* $f = -20$ *cm se coloca un objeto. ¿A qué distancia del espejo se encuentra la imagen?*

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x} = \frac{1}{-20} - \frac{1}{60} =$$

$$= -\frac{3+1}{60} = -\frac{4}{60} =$$

$$= -\frac{1}{15} \therefore x' = -15 \text{ cm}$$

El signo (—) indica que la imagen es virtual.

EJEMPLO: *¿Cuál será la altura de un objeto de 6 cm colocado a 80 cm de un espejo convexo de* $f = -40$ *cm?*

La misma fórmula vale para los espejos cóncavos, es decir:

$$h' = h\,\frac{x'}{x}$$

Hay que calcular x':

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x} \therefore$$

$$\therefore \frac{1}{x'} = \frac{x-f}{fx} \therefore$$

$$\therefore x' = \frac{fx}{x-f}$$

Luego

$$h' = h\,\frac{\dfrac{fx}{x-f}}{x} = \frac{hf}{x-f}$$

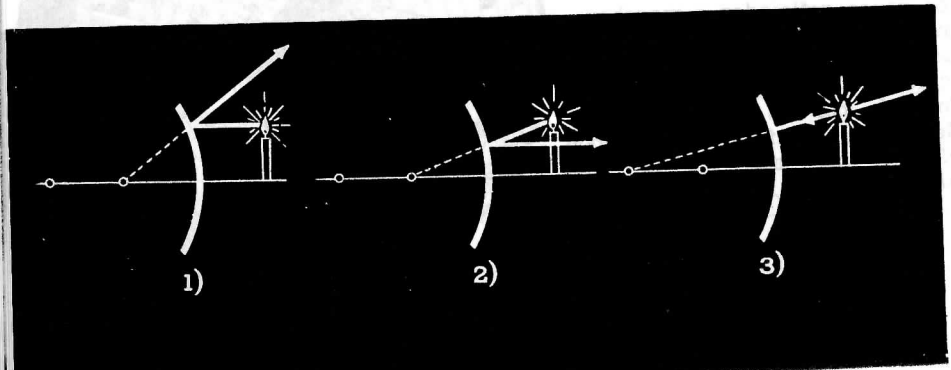
Con los datos

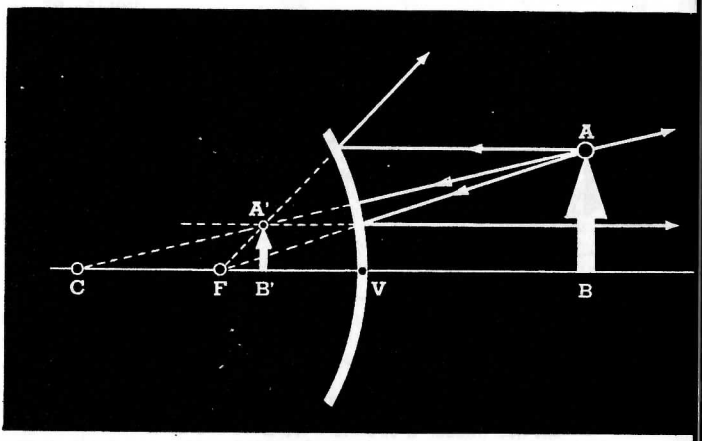
$$h' = 6 \text{ cm}\,\frac{-40 \text{ cm}}{80 \text{ cm} - (-40 \text{ cm})} =$$

$$= 6 \text{ cm}\,\frac{-40}{120} = -2 \text{ cm}$$

El signo negativo indica que la imagen es derecha, de acuerdo con

Los tres rayos principales correspondientes a un espejo convexo.





Construcción de la imagen producida por un espejo convexo, mediante los rayos principales.

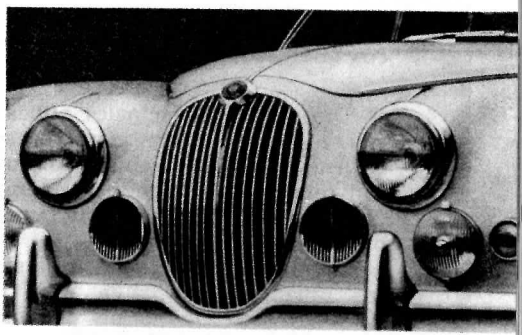
lo que convinimos respecto de los signos de las alturas.

Aplicaciones de los espejos

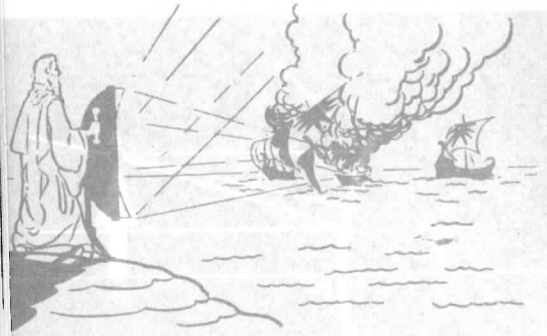
Son bien conocidos los espejos planos. En los modernos edificios públicos y en algunos comercios, se los usa como adorno y para dar sensación de mayor espacio, pues no se ven los espejos, sino las imágenes que dan. En los instrumentos científicos de medición, como los galvanómetros, sextantes, etc., tienen gran aplicación. Los médicos y dentistas usan espejitos cóncavos para examinar el globo del ojo, la laringe, los dientes, etc. También se usan para proyectar la luz de faros de automóviles y linternas, colocando la fuente luminosa en el foco del espejo: los rayos salen paralelos entre sí y tienen mayor alcance.

Una anécdota de Arquímedes

Durante el sitio de Siracusa por los romanos, dicen que un solo hombre los tuvo a raya: Arquímedes. Sabio e ingenioso, inventaba aparatos con que se atacaba a los romanos, muy superiores



En los automóviles, los faros están provistos de espejos cóncavos.



Cuenta la tradición que, mediante un espejo cóncavo, Arquímedes incendió las naves romanas que sitiaban a Siracusa. Pero la verdad es que de ninguna manera pudo Arquímedes construir tal espejo.

en número. Cuéntase que un día, con un gran espejo cóncavo, de distancia focal muy grande, concentró los rayos solares sobre las naves romanas, y las que no se incendiaron huyeron, si bien provisionalmente. Demasiado confiados los siracusanos en las virtudes de Arquímedes, descuidaron la vigilancia de la ciudad, y los romanos la tomaron por asalto. Pese a que Marcelo, el jefe romano, ordenó respetar la vida de Arquímedes, un soldado atravesó al sabio con su lanza, tal vez porque no lo conociera, y así terminó su existencia a los 55 años de edad, en el año —232.

Los telescopios gigantes

Una de las principales aplicaciones de los espejos cóncavos se realiza en los telescopios, aunque conviene aclarar que no se emplean espejos esféricos, sino más bien parabólicos.

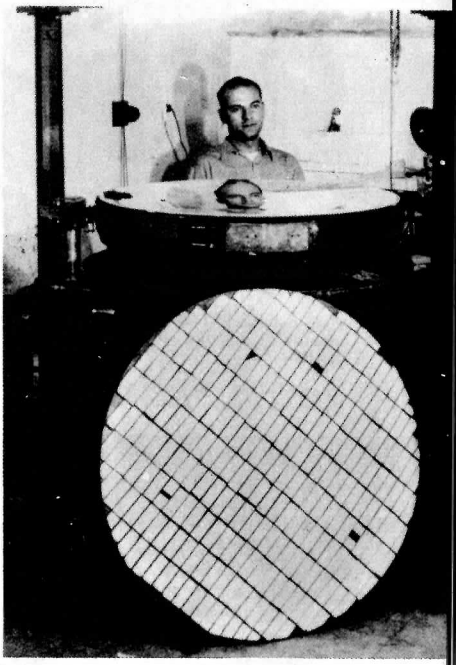
Cuando se mira una estrella sin instrumento alguno, la cantidad de luz de esa estrella que nos permite verla, es la que penetra a través de nuestras pupilas (abiertas unos 5 mm de diámetro); esa cantidad de luz excita las retinas, y así podemos distinguir la estrella.

Pero cuando la estrella está demasiado lejos, si bien nos llega luz de ella, y esa luz hiere nuestras retinas, la cantidad es tan pequeña que no alcanza a excitar nuestros nervios ópticos en la medida requerida para producirnos la sensación de luz; en una palabra: no vemos la estrella. En el telescopio el espejo cóncavo recoge toda la luz de la estrella que incide sobre él y la echa, por decir así, dentro de nuestro ojo. Si se tiene en cuenta que el telescopio del observatorio de Monte Palomar, en Estados Unidos, tiene un diámetro de 5 m, es decir, 1 000 veces mayor que el de nuestra pupila, la cantidad de luz que recoge ese espejo es 1 millón de veces mayor que la recibida sin anteojo alguno. Por eso se dice que los telescopios son exploradores del cielo, pues con su ayuda se llega a descubrir y estudiar estrellas extraordinariamente débiles o lejanas.

Uno de los primeros en aprovechar las propiedades de los espejos cóncavos para construir aparatos de observación fue Newton, creando un dispositivo que lleva su nombre: telescopio newtoniano.

En la República Argentina, el observatorio de Córdoba posee uno de los mayores telescopios del hemisferio austral; tiene un diámetro de 1,54 m, y está situado en las sierras de Córdoba, en un lugar denominado Bosque Alegre, cerca de Alta Gracia. Con ese telescopio, los astrónomos realizan una tarea de importancia mundial. Está en

Espejo de 90 cm de diámetro construido en Córdoba para un telescopio. En primer plano, la herramienta utilizada para pulir.



funcionamiento desde 1942 merced a la labor de Enrique Gaviola, uno de nuestros hombres de ciencia más eminentes.

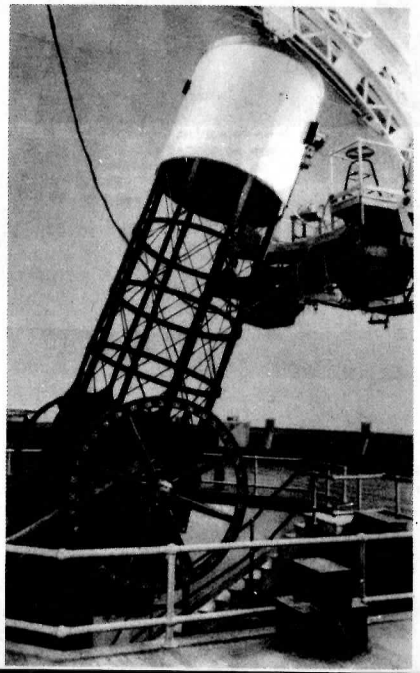
El telescopio más grande del mundo *

La primera publicación sobre las posibles ventajas y dificultades de un telescopio de 200 pulgadas de abertura (o sea 5,08 m) apareció en 1928. Ese mismo año, la Fundación Rockefeller adjudicó seis millones de dólares al California Institute of Technology, para la construcción del instrumento. Veinte años después, en junio de 1948, se inauguraba el supertelescopio.

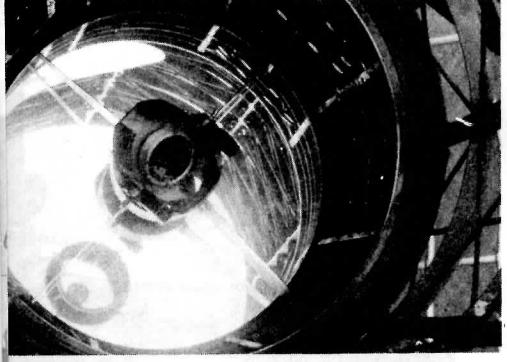
¿Dónde ubicarlo? Después de estudiar toda la parte austral de California se eligió a Monte Palomar, que está a 210 km de Los Ángeles y a 110 km de San Diego. Geológicamente la montaña es un islote de granito, lo que asegura la estabilidad de los edificios y pilares. Su cima no es un pico agudo, sino más bien un pequeño altiplano, permitiendo así que el telescopio esté alejado de las corrientes ascendentes de aire que suelen producir las laderas de las montañas en las primeras horas de la noche.

El montaje. El telescopio ha sido montado ecuatorialmente, es decir, con su eje de rotación paralelo al eje de la Tierra, pues sólo así es posible seguir el movimiento diurno de los astros, en dis-

* Extracto del artículo titulado "El gran telescopio de Monte Palomar", publicado por el astrónomo Bernhard H. Dawson, en la revista Ciencia e Investigación, en setiembre de 1948.

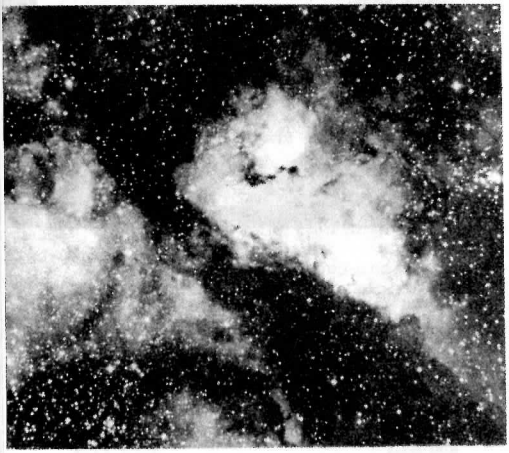


Telescopio reflector del Observatorio de Córdoba.



Vista del espejo principal y del pequeño espejo secundario, tomada desde el extremo superior del tubo.

Fotografía de una nebulosa tomada con el reflector de Bosque Alegre.



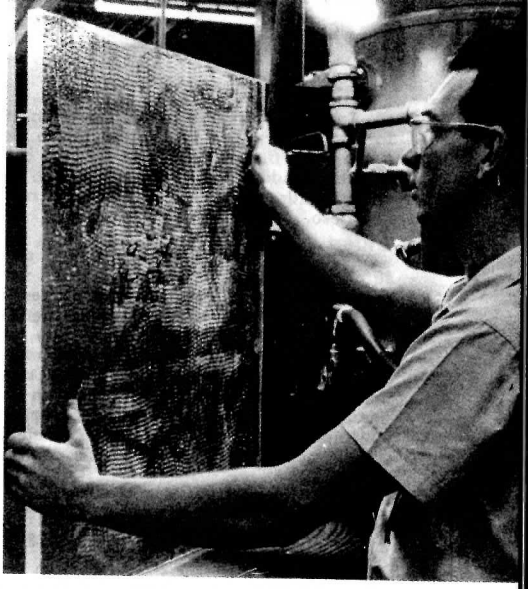
tintas partes del cielo, mediante un mecanismo automático. El tubo está en medio de un marco, cuyo travesaño superior ha sido reemplazado por un aro abierto o "herradura", lo que permite que el tubo entre hasta su centro y pueda observarse el polo celeste.

Consideraciones de rigidez obligan a que esta herradura tenga un diámetro de algo más de 14 metros, por lo que, como la superficie cilíndrica tenía que ser torneada y pulida después de armada definitivamente la pieza, y el transporte por ferrocarril de una pieza de tales dimensiones sería completamente imposible, la herradura terminada tuvo que ser trasladada así: por vía fluvial, desde Pensilvania hasta Nueva Orleans; por vía marítima desde allí hasta el puerto de Los Ángeles (en el Pacífico) y luego con su peso distribuido sobre varios acoplados de camiones, hasta la cumbre del Monte Palomar.

Para tratar de reducir el peso al mínimo posible, el "tubo" del telescopio ha sido reemplazado por un esqueleto rígido que parece un puente; y sin embargo, con el espejo principal, los espejos secundarios y los contrapesos, el total resulta ser de algo más de 160 toneladas. La herradura es hueca, pero pesa 90 toneladas. El peso total de las partes móviles llega a unas 50 toneladas.

¿Cómo apoyar semejante masa, para que pueda luego moverse suavemente? Es demasiado grande como para hacerla flotar en un tanque de mercurio, como se hizo con uno de los instrumentos del observatorio de Monte Wilson; por supuesto que no era posible pensar en

Pulido de un espejo en el Observatorio de Córdoba.



Cristal con 96 % de sílice para la ventana de una cápsula espacial. Su superficie arrugada difunde la luz que lo atraviesa.

cojinetes ni *rulemanes*. El problema se resolvió apoyando el telescopio sobre una película de aceite de unos 10 micrones de espesor, que se mantiene mediante inyección continua a una presión de 20 atmósferas.

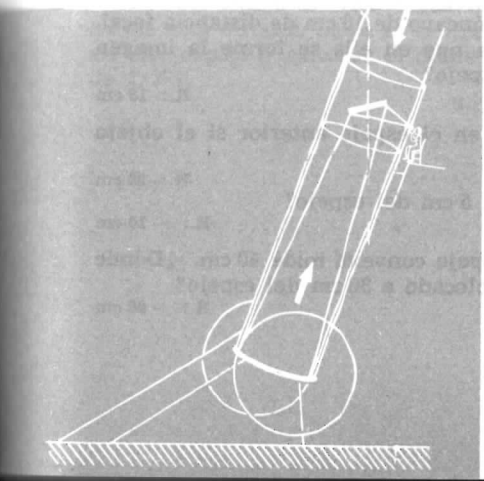
La innovación más espectacular es que el observador viaja a bordo del instrumento, mientras observa en el foco principal. Como sabemos, la imagen formada por el espejo parabólico simple de un telescopio reflector cualquiera, se produce en una región atravesada por la misma luz procedente del astro. Si el observador intenta interponer el ojo para ver la imagen en tal posición, su cuerpo intercepta luz y proyecta una sombra sobre el mismo espejo. Para evitar esto, lo que se hace es interponer un pequeño espejo secundario, que dirige la imagen a otra posición, donde puede observarse. Pero en el caso del telescopio de Monte Palomar, el tamaño del espejo secundario sería tal, que se ha optado por observar directamente en el foco principal.

Los movimientos del telescopio se realizan mediante controles a distancia, y entre los distintos puestos de mando hay comunicación telefónica.

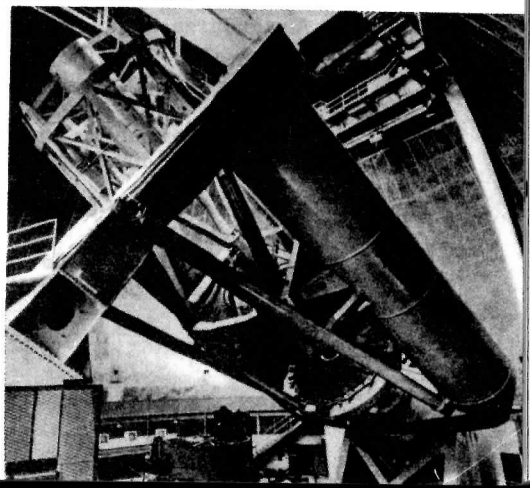
La cúpula tiene 42 m de diámetro y su parte exterior es de planchas de acero de 1 cm de espesor.

El disco de vidrio. Los discos para los espejos de los telescopios tienen, en general, un espesor de la sexta a la octava parte de su diámetro, con el fin de obtener la rigidez necesaria. Cuando la abertura es grande, el disco resulta una mole de vidrio; el de 100 pulgadas pesa cerca de 5 toneladas y, siguiendo la misma proporción, un disco de 200 pesaría 40 toneladas. Como el vidrio es mal conductor térmico, los cambios de temperatura que inevitablemente sufre el telescopio llegan con mucho retraso a la parte central del disco, por lo que éste sufrirá distorsiones por dilatación, sumamente dañinas. Por eso se eligió un vidrio *pyrex*, de coeficiente de dilatación cuatro veces menor que el vidrio común.

Camino de los rayos de luz dentro del telescopio.



Vista general del telescopio de Monte Palomar que muestra la jaula del foco principal en donde se coloca el astrónomo. El espejo se encuentra protegido por obturadores colocados en el extremo inferior del tubo.



En lugar de fabricar el disco en la forma "clásica" de un bloque sólido, se realizó una plancha de poco espesor, con un reticulado trasero de vigas que le da la rigidez necesaria con mucho menos peso.

Características ópticas. El fin que se persigue al hacer telescopios cada vez mayores no es el permitir más aumento y "traer" los astros a distancias menores. Lo que realmente se busca con las grandes aberturas, es recoger una mayor cantidad de luz, para obtener una imagen más intensa y registrar en la placa fotográfica astros de igual brillo con menor tiempo de exposición, o bien, con el mismo tiempo, astros más débiles que ahora no podemos registrar. Siendo así, no hay interés especial en que la distancia focal sea muy grande. Aunque el telescopio de Monte Palomar tiene el doble de la abertura del de Monte Wilson, su distancia focal es sólo 1/3 mayor.

El pulimento y tallado del espejo llevó aproximadamente 10 años, llegándose por fin a obtener una superficie pulida que distaba de lo teórico en menos de 1/20 de micrón. En total se quitaron 5 toneladas de vidrio empleándose más de 25 toneladas de polvos abrasivos.

Una vez dentro de la cúpula se impuso al disco una capa reflectora de aluminio, depositada por vaporización en vacío.

Problemas

1. Un rayo luminoso pasa por un punto A, incide sobre un espejo plano y el rayo reflejado pasa por un segundo punto B. Demostrar que el punto I de incidencia es tal que el camino A I B es mínimo.

2. En el problema anterior, dados los puntos A y B y el espejo, determinar gráficamente la posición del punto I.

3. Frente a un espejo plano y a 10 cm de él, se coloca un objeto de 3 cm de alto: *a)* ¿Dónde se forma la imagen?; *b)* ¿Bajo qué diámetro aparente se ve esa imagen?

R.: *a)* a 10 cm por detrás del espejo; *b)* 8,5°

4. Determinar la altura mínima y la posición, con respecto al suelo, de un espejo plano vertical para que una persona se vea entera en el espejo.

R.: La altura del espejo debe ser la mitad de la altura de la persona; su borde inferior debe estar a una distancia del suelo igual a la mitad de la altura del ojo.

5. ¿A qué distancia de un espejo cóncavo de 10 cm de distancia focal, deberemos colocar una pantalla, para que en ella se forme la imagen de un objeto colocado a 30 cm del espejo?

R.: 15 cm

6. ¿Dónde se formará la imagen en el espejo anterior si el objeto se coloca a 20 cm de distancia?

R.: 20 cm

7. ¿Ídem, si el objeto se coloca a 5 cm del espejo?

R.: — 10 cm

8. El radio de curvatura de un espejo convexo mide 40 cm. ¿Dónde se formará la imagen de un objeto colocado a 30 cm del espejo?

R.: — 60 cm

9. ¿Cuál es la distancia focal de un espejo convexo sabiendo que un objeto colocado a 4 cm de él da una imagen virtual situado a 2 cm del espejo? ¿Cuál es el radio de curvatura de ese espejo?

R.: — 4 cm; 8 cm

10. ¿A qué distancia de un espejo convexo de $f = -30$ cm habrá que colocar un objeto de 2 cm de altura para que su imagen tenga una altura de 4 cm?

R.: 30 cm

11. Un espejo cóncavo tiene una distancia focal de 20 cm. ¿Dónde habrá que colocar un objeto para obtener una imagen real 4 veces más grande?

R.: 25 cm

12. De un objeto luminoso rectilíneo y vertical se desea obtener una imagen real 16 veces más grande y proyectada sobre una pantalla vertical situada a 5,10 m del objeto. Determinar la posición, orientación y distancia focal del espejo cóncavo que permite obtener esa imagen.

R.: Se necesita un objeto cóncavo de 32 cm de distancia focal, colocado a 34 cm del objeto y del lado opuesto a la pantalla

13. Una persona examina su ojo –que podemos considerar como una flecha de 1,5 cm de largo perpendicular al eje óptico– en un espejo cóncavo de 12 cm de distancia focal, situado a 10 cm del ojo: *a)* ¿Dónde se forma la imagen del ojo?; *b)* ¿Bajo qué diámetro aparente se ve esa imagen?; *c)* Comparar estos resultados con los que se obtendrían empleando un espejo plano que ocupara la misma posición que el espejo cóncavo.

R.: — 60 cm; 14,5°; en el espejo plano, el diámetro aparente es de 8,5° (ver problema Nº 3)

14. Un punto luminoso A, está colocado a 40 cm de distancia de un espejo cóncavo C, de 30 cm de distancia focal. ¿Dónde habrá que colocar un espejo plano P, perpendicular al eje de C, para que los rayos que partan de A y se reflejen sucesivamente en los dos espejos vuelvan a converger en A?

R.: A 80 cm del espejo cóncavo

15. Un espejo esférico cóncavo tiene un radio de curvatura de 4 m; su eje está dirigido hacia el centro del Sol; construir la imagen del Sol en este espejo y calcular el diámetro (el diámetro aparente del Sol es de 1/2°).

R.: La imagen se forma en el foco del espejo y tiene un diámetro de 1,7 cm

4 LA REFRACCIÓN DE LA LUZ

¿Qué es la refracción?

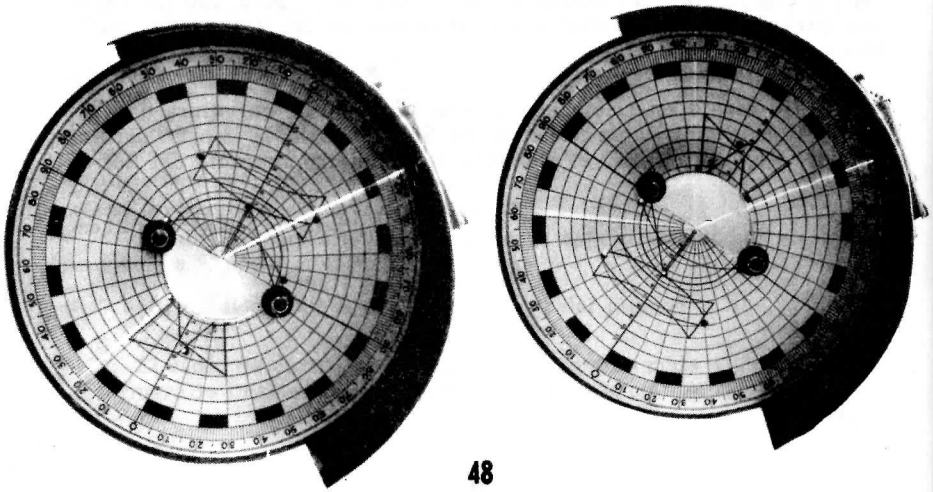
Si un rayo de luz pasa de un medio transparente a otro medio también transparente pero de distinta densidad –por ejemplo, del aire al agua–, se desvía de su dirección primitiva, como se observa en las figuras.

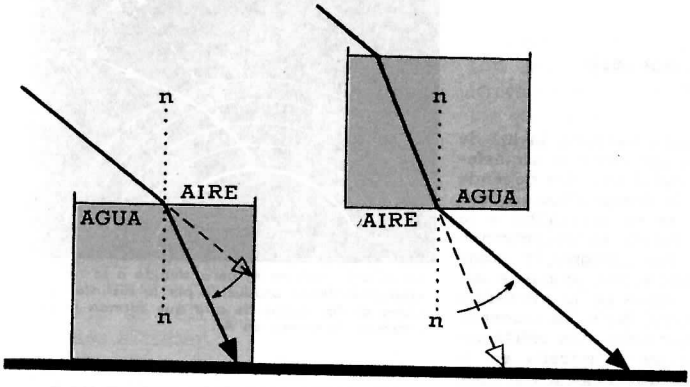
Refracción de la luz es el fenómeno físico en que un rayo de luz, al atravesar la superficie de separación de dos medios transparentes, se desvía de su dirección primitiva.

Experiencia

Póngase una moneda en el fondo de una taza vacía, y colóquese una persona de modo que la pared de la taza le impida ver la moneda. ¿Qué se deberá ha-

Izq.): Un rayo de sol incide en el centro de un semidisco de vidrio, y al entrar en él se desvía, pero al salir no, pues el rayo emergente es normal a la superficie del borde del disco. Der.): El rayo incide normalmente en la superficie lateral del disco, y por ello entra sin desviarse. Pero sí se desvía al pasar del vidrio al aire.



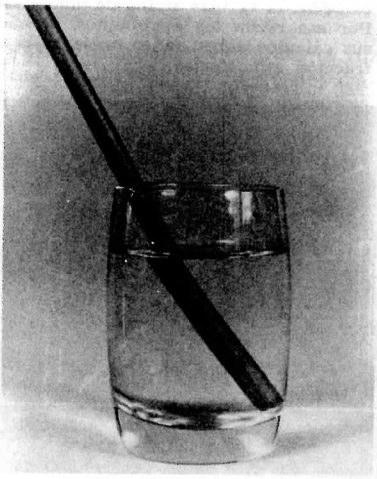


Al pasar a un medio más denso, el rayo luminoso se quiebra, acercándose a la normal; al pasar a uno menos denso, la luz se aleja de la normal.

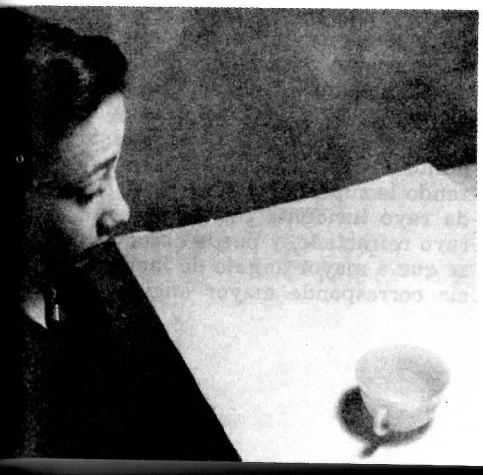
cer para que la persona pueda ver la moneda, sin moverse y sin tocarla? *Respuesta:* Llenar la taza con agua. Mientras se está echando el agua, se observará que primero se percibe una pequeña parte de la moneda, que luego, a medida que su nivel sube, se va haciendo mayor. También se tiene la sensación de que el fondo de la taza y la moneda suben con el nivel del agua.

La refracción explica esta experiencia. En efecto, la luz no puede llegar *en línea recta* al observador porque se lo impide la pared de la taza, esté llena o vacía. Si cuando está llena se ve la moneda, es porque *hay* rayos de luz que desde la moneda llegan al observador. Como no pueden seguir un camino rectilíneo, es evidente que siguen una línea quebrada y que la desviación se produce al atravesar la superficie del agua.

Al sumergir un lápiz oblicuamente en agua se tiene otro ejemplo de refracción: se lo ve quebrado en la superficie del líquido.

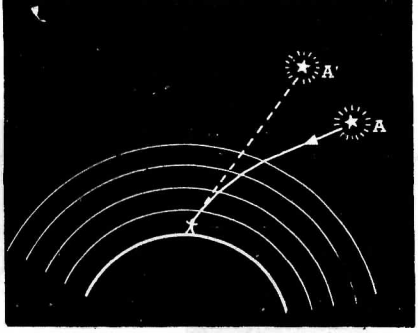


Por la refracción de la luz, el tubo se ve como quebrado.



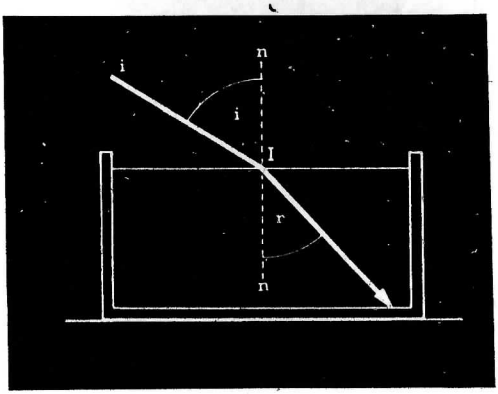
Las estrellas están más abajo de donde se las ve

Para llegar hasta nosotros, la luz de una estrella debe atravesar la atmósfera. Como la densidad del aire depende de la presión y la temperatura, a medida que la luz se va acercando a la superficie de la Tierra va encontrando densidades cada vez mayores, y como esto sucede gradualmente, se puede admitir que la luz sigue en la atmósfera un camino quebrado. De todas maneras, llega hasta el observador con cierta inclinación, y éste ve la estrella en la dirección del rayo que llega a sus ojos, es decir, la ve más arriba de donde está. Por esa razón los astrónomos, al hacer sus cálculos deben tener presente la refracción atmosférica.

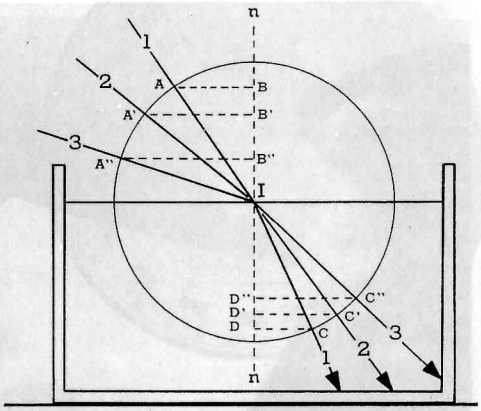


La estrella está en A; pero, debido a la refracción atmosférica producida por la distinta densidad de las capas de aire que forman la atmósfera, la vemos en A'.

En cierta ocasión se produjo un hecho curioso, debido a esta refracción: durante un eclipse de Luna se veían simultáneamente el Sol y la Luna por encima del horizonte.



Arriba): Ángulos de incidencia y refracción. Abajo): Una sencilla experiencia que permite comprobar las leyes de la refracción.



Las leyes de la refracción

El rayo que llega a la superficie se llama *rayo incidente*; el rayo desviado, *rayo refractado*; el ángulo del rayo incidente con la normal, *ángulo de incidencia*; el que forma el rayo refractado con la normal, *ángulo de refracción.*

PRIMERA LEY: *El rayo incidente, el rayo refractado y la normal están en un mismo plano, llamado plano de incidencia.*

SEGUNDA LEY: Sumerjamos un disco en agua hasta la mitad, de modo que su plano sea perpendicular a la superficie del agua. Hagamos incidir en un mismo punto *I* tres rayos que pasen rozando la superficie del disco. A cada rayo incidente corresponde un rayo refractado, y puede observarse que a mayor ángulo de incidencia corresponde mayor ángulo de

refracción. Así, si a un ángulo de incidencia de 30° corresponde un ángulo de refracción de 22°, a uno de 60° corresponde un ángulo de refracción de unos 42°, mayor que 22°, pero no el doble. No hay, pues, una proporcionalidad directa entre ángulo de incidencia y ángulo de refracción. ¿Cuál es la relación que vincula a cada ángulo de incidencia con su correspondiente de refracción? Es lo que vamos a tratar.

En el borde del disco se marcan los puntos A, A', A" por donde entran los rayos, y C, C', C" por donde salen; se trazan la normal n en I, y las perpendiculares a n que pasan por los seis puntos anteriores. Se obtienen así los puntos B, B', B", D, D', D". En una experiencia realizada por nosotros, medimos los segmentos y obtuvimos:

$$AB = 48 \text{ mm} \qquad A'B' = 60 \text{ mm}$$
$$CD = 36 \text{ mm} \qquad C'D' = 45 \text{ mm}$$
$$A''B'' = 72 \text{ mm}$$
$$C''D'' = 54 \text{ mm}$$

Si se divide cada segmento de los AB por su correspondiente de los CD se obtiene:

$$\frac{AB}{CD} = \frac{4}{3} \qquad \frac{A'B'}{C'D'} = \frac{4}{3}$$
$$\frac{A''B''}{C''D''} = \frac{4}{3}$$

o sea que:

$$\frac{AB}{CD} = \frac{A'B'}{C'D'} = \frac{A''B''}{C''D''} = \frac{4}{3}$$

El valor de esos cocientes no altera si se dividen los numeradores y los denominadores por radios de una misma circunferencia:

$$\frac{AB/AI}{CD/IC} = \frac{A'B'/A'I}{C'D'/IC'} =$$
$$= \frac{A''B''/A''I}{C''D''/IC''} = \frac{4}{3}$$

Pero ahora los numeradores son los senos de los ángulos de incidencia, y los denominadores los senos de los ángulos de refracción:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\text{sen } i'}{\text{sen } r'} = \frac{\text{sen } i''}{\text{sen } r''} = \frac{4}{3}$$

De modo, pues, que cuando un rayo de luz pasa del aire al agua, a cada ángulo de incidencia le corresponde un ángulo de refracción tal que el cociente de sus respectivos senos vale 4/3. A este valor se lo llama *índice de refracción del agua con respecto al aire.*

Lo mismo sucede cuando la luz atraviesa la superficie de separación de dos sustancias transparentes, cualesquiera sean ellas, con la diferencia de que cada par de sustancias tiene su propio y característico índice de refracción, considerándoselo siempre como de la *segunda sustancia respecto de la primera.*

Enunciado de la segunda ley: *El cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante, y se llama índice de refracción de la segunda sustancia con respecto a la primera.*

En símbolos:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n_{2,1}$$

Índice relativo e índice absoluto

Hasta ahora nos hemos referido al índice de refracción de una sustancia con respecto a otra. A ese índice se lo llama *índice relativo.*

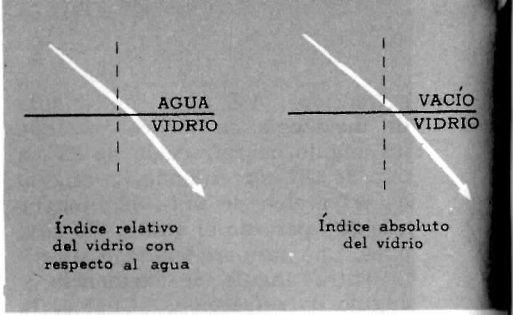
En cambio, si se considera un rayo de luz que incide desde el vacío, se obtiene el índice de refracción de la sustancia considerada con respecto *al vacío*, al que se llama *índice absoluto*.

Si llamamos n_1 y n_2 a los índices absolutos de dos sustancias, y $n_{2,1}$ al índice de la segunda con respecto a la primera, se cumple que:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Así, el índice absoluto del vidrio *flint* liviano es 1,580; el del agua a 20° C es 1,333. El índice del vidrio respecto del agua es:

$$\frac{1,580}{1,333} = 1,185$$



Cuando la luz pasa del agua al vidrio, se define el índice de refracción relativo del vidrio con respecto al agua; si la luz pasa del vacío al vidrio, se define el índice absoluto del vidrio.

El índice del vacío tiene el valor 1; el del aire es 1,0003. Como son tan cercanos, es aproximadamente lo mismo considerar el índice de refracción absoluto de una sustancia, o su índice con respecto al aire.

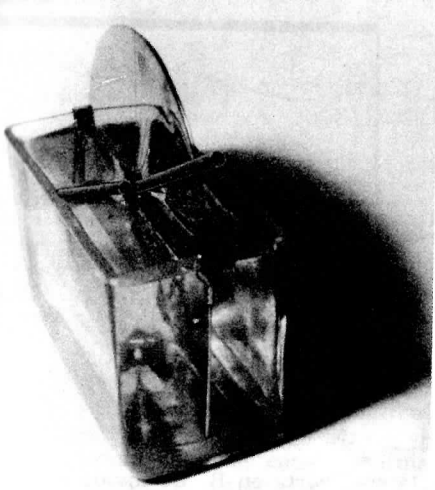
TABLA DE ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE ALGUNAS SUSTANCIAS *

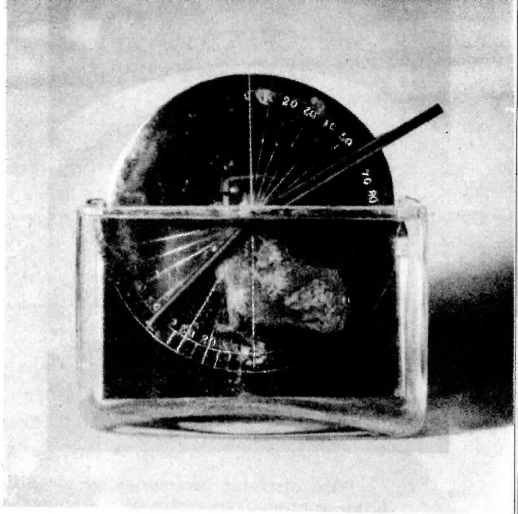
Sólidos (Alrededor de 20° C)		*Líquidos* (20° C)		*Gases* (0° C y 760 mm 4 g)	
Yodo	3,34	Hidrógeno	1,097	Aire	1,000 29
Sodio	4,22	Nitrógeno	1,205	Argón	1,000 28
Ámbar	1,55	Oxígeno	1,221	Dióxido de C.	1,000 45
Parafina	1,43	Agua	1,333	Cloro	1,000 77
Vidrios		Alcohol etílico	1,360	Helio	1,000 04
Crown	1,52	Bisulfuro de carbono	1,625	Hidrógeno	1,000 13
Flint				Nitrógeno	1,000 30
liviano	1,58			Oxígeno	1,000 27
pesado	1,65			Agua	1,000 25
muy pesado	1,89				
Hielo	1,31				

Un poco de historia

El filósofo griego Aristóteles habla ya del rayo *refractado* por el agua, pero el primero que realiza un estudio experimental completo, unos cien años después de Jesucristo, es Tolomeo de Alejandría, quien investigó el conocido fenómeno de un bastón que sumergido a medias en el agua parece

* Datos extraídos de *Handbook of Chemistry and Physics*, de Ch. Hodgman, edición de 1936, aproximando la última cifra. El índice de refracción depende principalmente del *color de la luz empleada*; los aquí citados se refieren a la luz amarilla del sodio.





Mirando desde arriba, las varillas se ven alineadas; de frente, quebradas. En esencia, éste es el aparato de Tolomeo.

quebrado. Sin embargo, no se contentó con repetir la observación, sino que efectuó mediciones y trató de ver en cuánto se desviaba el rayo de luz de su trayectoria al entrar en el agua.

El aparato que construyó era, en esencia, igual al que se utiliza hoy en las aulas para demostrar las leyes de la refracción: constaba de un círculo graduado y de dos reglas que podían girar alrededor del centro del círculo. Sumergía a éste en agua hasta la mitad, ponía la regla inferior en una posición cualquiera, y luego hacía girar la regla superior hasta que, mirando desde arriba, a través de la superficie del agua, se viera a las dos reglas formar una misma línea recta.

Tolomeo efectuó medidas bastante precisas, pero no logró establecer la segunda ley de la refracción. Sin embargo, dejó bien establecido que el rayo luminoso se acerca a la normal cuando pasa de un medio a otro más denso, y, recíprocamente, que al pasar de un medio más denso a otro menos denso, se aleja de la normal.

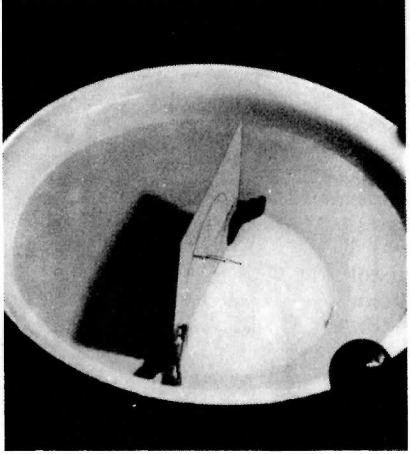
Las leyes de la refracción fueron enunciadas por Descartes –célebre filósofo francés– en el siglo XVII.

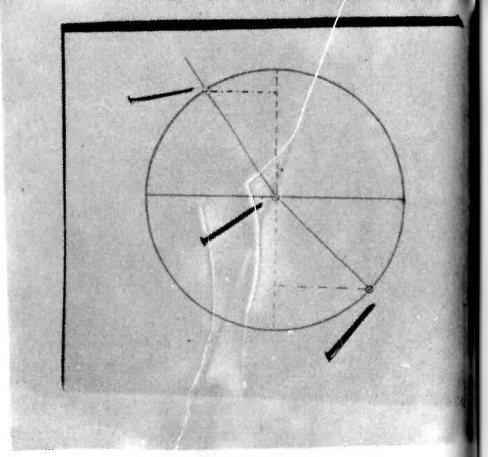
EXPERIENCIA CASERA. En un cartón se traza una circunferencia y dos diámetros perpendiculares. Se clava un alfiler en el centro y otro en un punto de la circunferencia. Se sumerge el cartón hasta que uno de los diámetros trazados, paralelo a la superficie del agua, la toque.

Sobre la semicircunferencia que queda fuera del agua se clava un tercer alfiler, de modo que se vea alineado con los otros dos.

Se saca el cartón del agua y se trazan los radios que pasan por los puntos de la circunferencia donde estuvieron clavados los alfileres: esos radios representan el camino seguido por el rayo de luz que empleamos para alinear los alfileres.

Se miden las distancias desde los dos puntos anteriores hasta el segundo diámetro (éste representa la normal), se divide la distancia mayor por la menor y el cociente es el índice de refracción del agua con respecto al aire: 4/3.



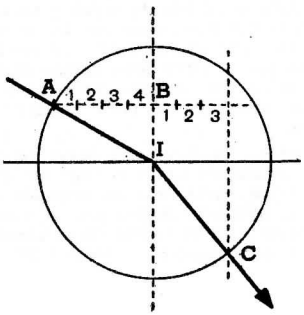


Para distintas posiciones de los alfileres se obtendrán distintas distancias, y el cociente ordenado de cada par permitirá comprobar que es siempre el mismo: es decir, que permitirá comprobar la segunda ley de refracción.

Gráfica del rayo refractado

El problema consiste en: dado el rayo incidente y el índice de refracción, construir gráficamente el rayo refractado. Por ejemplo: un rayo de luz incide en la superficie de separación agua-aire con un ángulo $i = 60°$. Construir el rayo refractado $(n = 4/3)$.

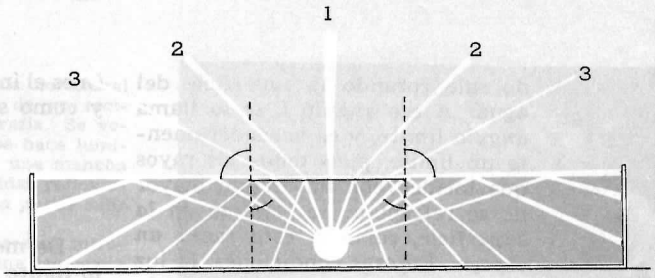
Con centro en el punto de incidencia, se traza una circunferencia de radio cualquiera, que corta al rayo incidente en A. Por A se traza la perpendicular a la normal, a la cual corta en B. Se divide el segmento A B en 4 partes iguales; en el semiplano respecto de la normal que no contiene a A, se traza una paralela a la normal, a una distancia de ella igual a 3 de las 4 partes en que se dividió el segmento A B. Esa paralela corta a la circunferencia en un punto C, que con I determina el rayo refractado.



Apoyándose en la segunda ley de la refracción, justifíquese esta construcción.

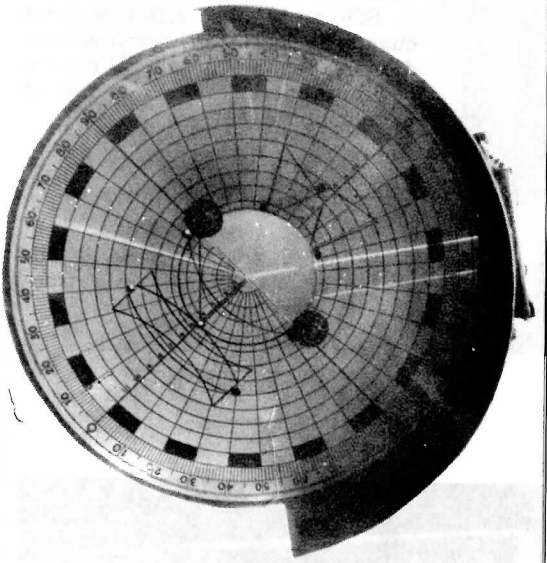
La reflexión total

Cuando un rayo de luz pasa de un medio transparente a otro, una parte se refleja y otra atraviesa la superficie y se refracta. Sin embargo, en ciertas condiciones la luz no puede atravesar la superficie de separación, aun cuando los dos medios sean perfectamente transparentes, y *se refleja totalmente*. Se coloca un foco luminoso dentro de un recipiente con agua, y se

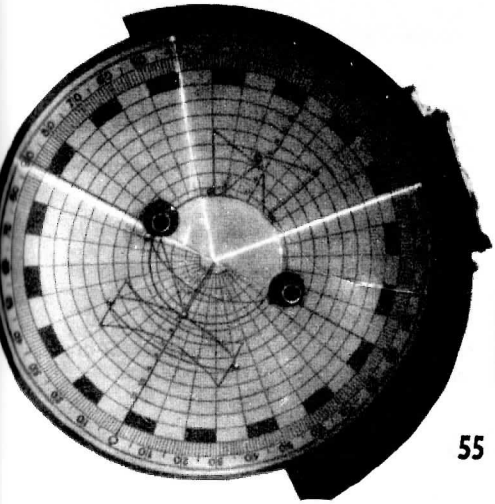


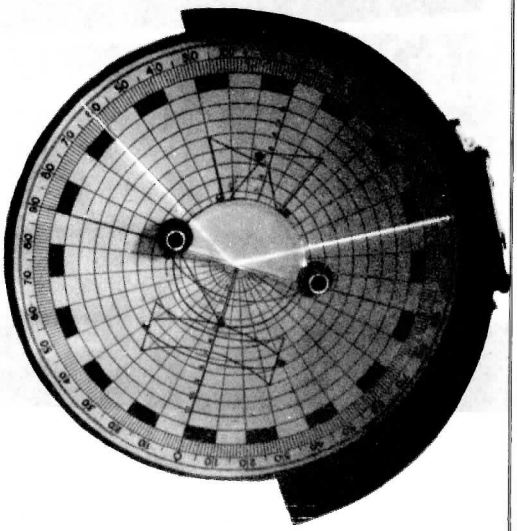
El ángulo límite y su correspondiente refractado de 90° están señalados con arcos a ambos lados del rayo central. Obsérvese que a medida que aumenta el ángulo de incidencia, aumenta también la cantidad de luz reflejada, hasta que, al pasar el ángulo límite, toda la luz del rayo incidente se refleja completamente.

observan los rayos que parten de él. El rayo 1, que incide normalmente, no se desvía, y el rayo refractado coincide con la normal. El rayo 2, en parte se refleja y en parte se refracta alejándose de la normal; lo mismo sucede con el rayo 3 y su refractado. Si se consideran ángulos de incidencia mayores, cada vez serán mayores los de refracción, hasta que para un cierto ángulo de incidencia *l*, el ángulo de refracción vale 90°, lo que significa que el rayo refracta-



Un rayo de luz incide en la superficie de separación vidrio-aire con un ángulo de unos 35°, y se refracta alejándose de la normal.
Se ha aumentado el ángulo de incidencia, que vale unos 42°. Se advierte que el rayo en parte se refleja y en parte se refracta formando un ángulo de refracción de casi 90°.
El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite: la luz se refleja totalmente.





do sale rozando la superficie del agua. A ese ángulo l, se lo llama *ángulo límite*, y es verdaderamente un límite, pues todos los rayos que inciden con un ángulo mayor no se refractan: *se reflejan en la superficie, como si ésta fuera un espejo.* En esas condiciones, la luz no puede salir del agua, y el fenómeno se llama *reflexión total.*

Sólo se produce reflexión total cuando la luz incide desde el medio más denso, y cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite.

Cálculo de ángulos límites

Como al ángulo límite le corresponde un ángulo de refracción de 90°,

$$\frac{\text{sen } l}{\text{sen } 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

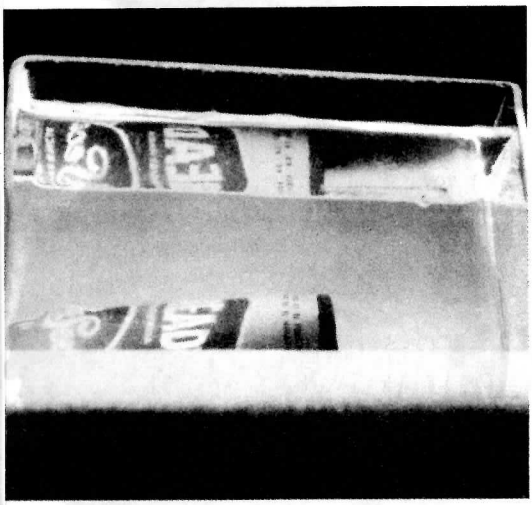
(*n* es el índice del medio más denso) y como sen 90° = 1, resulta

$$\text{sen } l = \frac{1}{n}$$

De modo que *el seno del ángulo límite es igual a la recíproca del índice del medio más denso.* Para el agua, por ejemplo, cuyo índice respecto del aire es 4/3, corresponde un ángulo límite cuyo seno vale 3/4; el ángulo cuyo seno vale 3/4 es 48°, aproximadamente, de modo que ése es el ángulo límite del agua. Si un rayo de luz que va por dentro del agua incide sobre la superficie con un ángulo de 48°, sale tangente a la superficie; si otro rayo incide con un ángulo mayor que 48°, nada de él sale al aire, y se refleja totalmente en la superficie.

Ángulos límites de algunas sustancias

Agua	48°
Vidrio	42°
Diamante	36°



Ejemplos de reflexión total

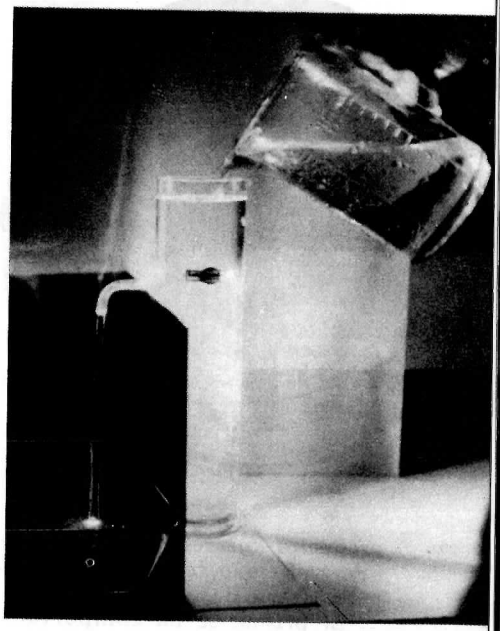
1. Colóquese un recipiente con agua en el borde de una mesa y obsérvese la superficie mirando desde abajo: se verán las imágenes de los objetos colocados sobre la mesa. (Así se tomó la fotografía que ilustra esta página.)

2. Sosténgase un vaso de agua con la mano. Mirando desde arriba de la superficie, y a pesar de que el vidrio y el agua son transparentes, parte de los dedos que sostienen el vaso no son visibles. Repítase la experiencia con los dedos mojados. ¿Cómo se explica la diferencia?

3. Diríjase un haz de luz horizontal hacia el agujero de salida de un recipiente como el de la fotografía. Se verá que el chorro de agua se hace luminoso, y que donde cae hay una mancha de luz. Debido a las repetidas reflexiones totales, el haz de luz no puede salir del interior del chorro.

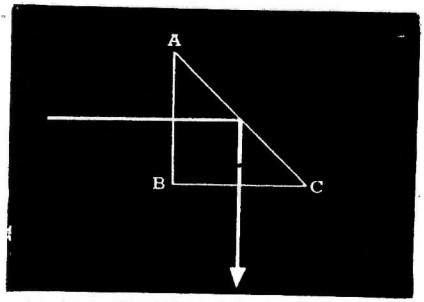
La experiencia puede hacerse introduciendo en el recipiente una lamparita eléctrica encendida. Además, si se conecta un tubito de goma con el tubo de salida, se podrá dirigir el haz en cualquier dirección, como si fuera una "manguera de luz".

Este fenómeno se emplea en medicina. Mediante él se conduce un rayo luminoso por la laringe y el esófago, lo que permite el examen de estos órganos.



Prismas de reflexión total

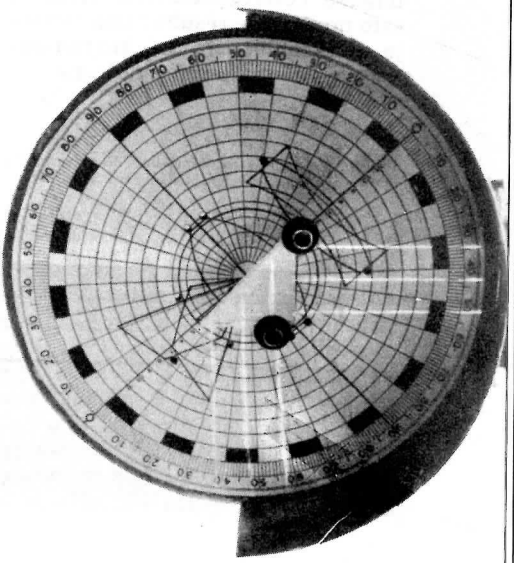
Sea un prisma cuya sección normal es un triángulo rectángulo isósceles, y cuyo índice de refracción es de 1,5. Para ese índice co-

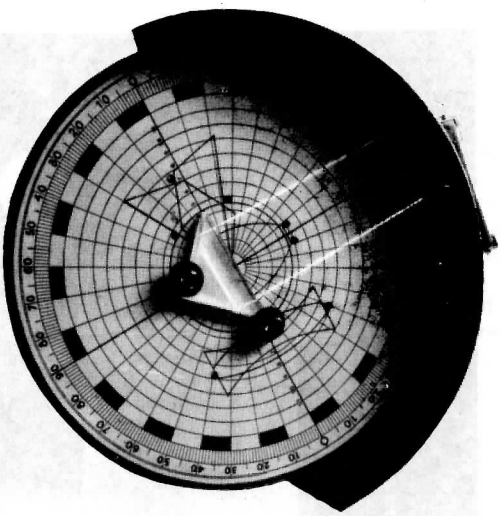


Corte de un prisma de reflexión total y marcha de un rayo a través del mismo.

rresponde un ángulo límite de 42°, de modo que todo rayo que incida con un ángulo mayor se reflejará totalmente.

Si sobre una de las caras del prisma se hace incidir un rayo normal a la misma penetrará en el prisma sin desviarse, de modo que incidirá sobre la cara A C con un ángulo de 45°; como es mayor que el ángulo límite, en la cara A C se





producirá una reflexión total, y el rayo reflejado totalmente saldrá por la cara B C sin desviarse.

El prisma se ha comportado, pues, como un espejo plano colocado en A C, con la ventaja de que la superficie de ese "espejo" no necesita cuidado alguno para mantenerse constantemente limpia; esto no deja de resultar una ventaja apreciable para los instrumentos en que pudieran emplearse.

Espejismo

El espejismo es un fenómeno de reflexión total. Como el aire caliente es menos denso que el frío, cuando por acción de la radiación solar el suelo se calienta, las capas de aire que están en contacto con él están más calientes que las superiores, y son, por lo tanto, menos densas. Un rayo de luz como el que indica la figura va incidiendo con ángulos cada vez mayores, por sucesivas refracciones, hasta alcanzar el ángulo límite, y a partir de entonces se produce la reflexión total.

Cuando se viaja en automóvil, en verano, en días en que la radiación solar es muy intensa, es común observar el fenómeno del espejismo: sobre el camino, a lo lejos, parece que hubiera agua. Es el cielo, que se ve por reflexión total. El mismo fenómeno puede observarse en pleno campo: se tiene la sensación de que hay pequeñas lagunas, aún a distancias de no más de 300 m.

Una de las formas del espejismo: la refracción en las capas de aire de distinta densidad, hace que el explorador vea la palmera, pero invertida.

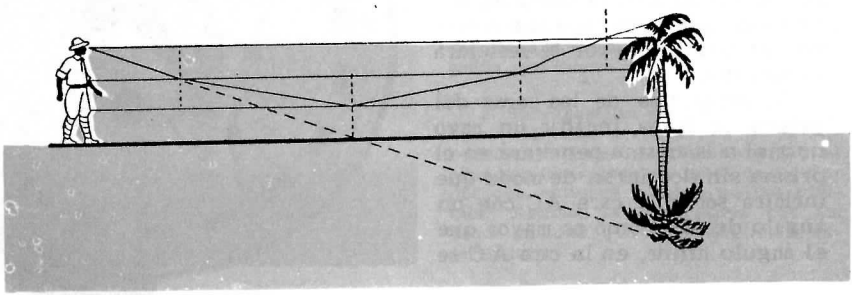


Lámina de caras paralelas

Un trozo de una sustancia transparente, limitado por dos planos paralelos, constituye lo que en física se llama "lámina de caras paralelas". *Ejemplo*: el vidrio de una ventana. Estudiaremos qué ocurre a un rayo de luz que la atraviese.

Sea un rayo incidente sobre una de las caras: al entrar se refracta e incide sobre la cara opuesta, donde nuevamente se refracta y sale al exterior (siempre que incida con un ángulo menor que el límite). ¿Cómo afectan al rayo estas dos refracciones?

En la primera refracción,

$$\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = n_{2,1}$$

y en la segunda,

$$\frac{\operatorname{sen} i'}{\operatorname{sen} e} = n_{1,2}$$

Como,

$$n_{2,1} = \frac{1}{n_{1,2}}$$

se verifica que

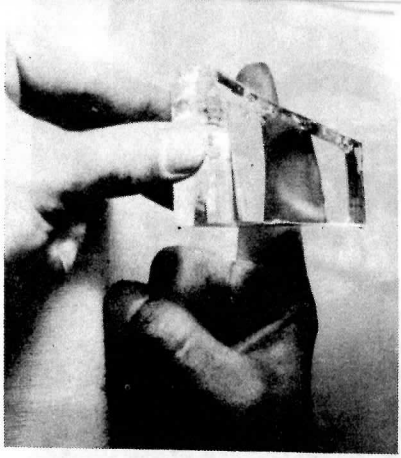
$$\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = \frac{\operatorname{sen} e}{\operatorname{sen} i'}$$

y como $r = i'$, es $\operatorname{sen} r = \operatorname{sen} i'$; de modo que también

$$\operatorname{sen} i = \operatorname{sen} e$$

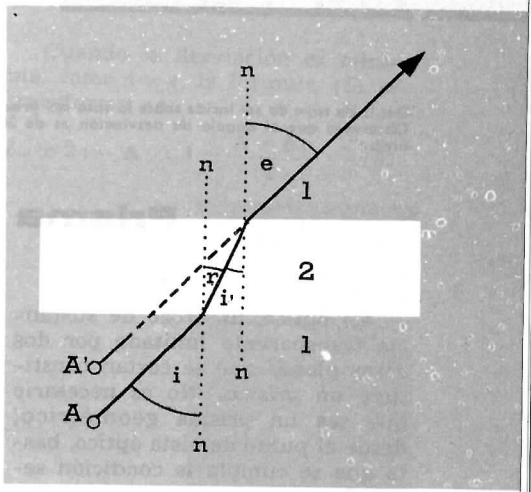
y por lo tanto,

$$i = e$$

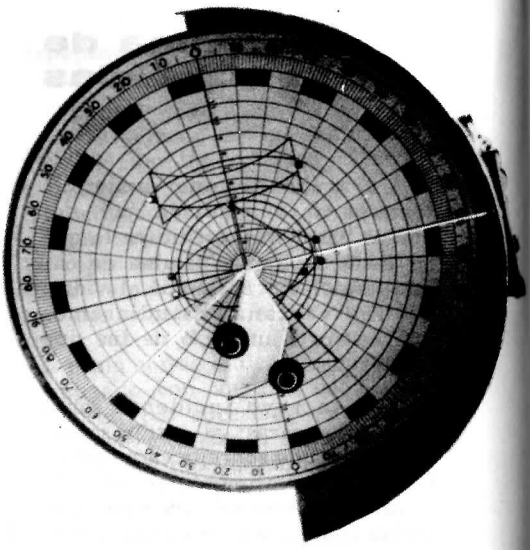


El vidrio de la fotografía tiene un espesor de unos 2 cm. Con ayuda del esquema de la parte inferior de la página, determínese cómo está inclinado.

Refracción en una lámina transparente de caras paralelas.



En consecuencia, un rayo de luz que atraviesa una lámina de caras paralelas no se desvía, sino que sufre un desplazamiento lateral, pues se mantiene paralelo a sí mismo. El desplazamiento es tanto mayor cuanto mayor es el espesor de la lámina y cuanto mayor es el ángulo de incidencia.



Der.): Un rayo de sol incide sobre la cara del prisma, cerca de la arista, y es desviado hacia la base. Obsérvese que el ángulo de desviación es de 30°. Izq.): Con un prisma, las cosas se ven "más arriba".

Prisma

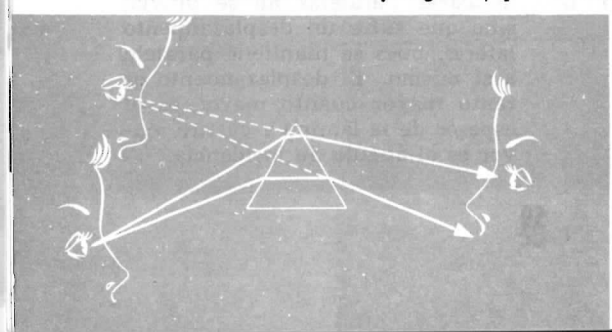
En óptica, un trozo de sustancia transparente limitado por dos caras planas que se cortan constituye un *prisma*. No es necesario que sea un prisma geométrico; desde el punto de vista óptico, basta que se cumpla la condición señalada.

La intersección de esas dos caras se llama *arista refringente*, y el ángulo que ellas forman, *ángulo de refringencia*, o *ángulo del prisma*.

Si llamamos i al ángulo de incidencia en la superficie aire-vidrio, r al correspondiente ángulo de refracción, i' al ángulo de incidencia en la superficie vidrio-aire, y e al ángulo con que el rayo emerja del prisma, se cumple que

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\text{sen } e}{\text{sen } i'} = n \qquad (1)$$

siendo n el índice de refracción del vidrio respecto del aire.



Por qué el prisma forma las imágenes "más arriba" que los objetos.

Por otra parte, si llamamos δ al ángulo de la desviación del rayo luminoso, se tiene, por una propiedad de los ángulos exteriores de un triángulo,

$$\delta = (i - r) + (e - i') \qquad (2)$$

Además, por tener $\widehat{n\,n'}$ y A sus lados perpendiculares y ser uno de ellos agudo y el otro obtuso,

$$\widehat{n\,n'} + A = 180^\circ \qquad (3)$$

Del triángulo que tiene por ángulos $n\,n'$, r e i' resulta

$$\widehat{n\,n'} + r + i' = 180^\circ \qquad (4)$$

De (3) y (4) resulta

$$A = r + i'$$

Si se reemplaza por A en la fórmula (2), la desviación es

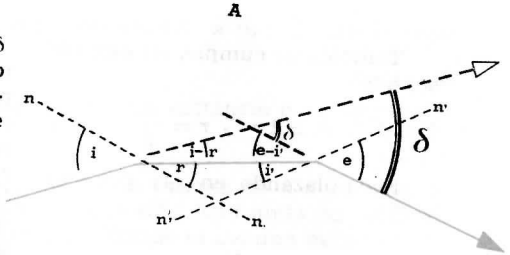
$$\delta = i + e - A \qquad (5)$$

Esta fórmula indica que la desviación que sufre un rayo de luz al atravesar un prisma depende del ángulo de incidencia, del de emergencia y del ángulo del prisma.

Desviación mínima

Hagamos incidir un rayo de luz sobre un prisma y observemos el ángulo de desviación. Si se hace girar al prisma alrededor del punto de incidencia, se verá que varía el ángulo de desviación. Se comprobará que haciendo girar el prisma siempre en el mismo sentido, la desviación comienza disminuyendo cada vez más, hasta alcanzar un valor mínimo, a partir del cual, y aunque el prisma sigue girando en el mismo sentido, la desviación comienza a aumentar. Cuando se produce la desviación mínima, se comprobará que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de emergencia:

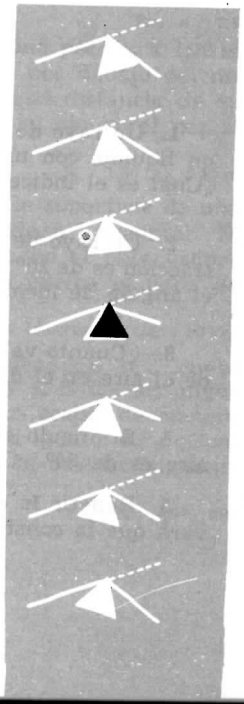
Cuando $\delta = \delta_m$, es $i = e$



Desviación mínima e índice de refracción

Cuando la desviación es mínima, como $i = e$, la fórmula (5) se transforma en:

$$\delta_m = 2\,i - A \quad \therefore \quad i = \frac{A + \delta_m}{2} \qquad (6)$$



La desviación producida por el prisma es mínima cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de emergencia.

También se cumple, en este caso, que

$$r = i' \therefore A = 2r \therefore r = \frac{A}{2} \qquad (7)$$

Reemplazando en (1) por (6) y (7):

$$n = \frac{\operatorname{sen} \frac{A + \delta_m}{2}}{\operatorname{sen} \frac{A}{2}}$$

Esta fórmula es muy importante, y justifica todo nuestro interés por estudiar el prisma. En efecto, cuando se quiere medir con precisión el índice de refracción de una sustancia determinada, se construye un prisma con ella y se miden con mucha precisión los ángulos A y δ_m; la fórmula que hemos obtenido permite el cálculo del índice.

Para medir el índice de refracción de un líquido se llena con éste un prisma hueco, y se procede como antes.

Problemas

1. Un rayo de luz incide en la superficie de separación del aire con un líquido, con un ángulo de 60°, y el ángulo de refracción mide 45°. ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?

R.: $n = 1{,}25$

2. Un rayo de luz penetra en el agua de modo que el ángulo de refracción es de 25°; el índice de refracción del agua es 1,33. ¿Cuánto vale el ángulo de incidencia?

R.: $i = 34°$

3. ¿Cuánto valdrá el ángulo de refracción de un rayo que entra desde el aire en el diamante, si el ángulo de incidencia es de 19°?

R.: 8°

4. El ángulo de incidencia de un rayo de luz que pasa del agua al aire es de 30°. Construir gráficamente el rayo refractado. ($n = 3/4$.)

5. Repetir la construcción para un ángulo de incidencia de 60°; se verá que la construcción no es válida para este ángulo. ¿Por qué?

6. Calcular el ángulo límite que corresponde a una sustancia cuyo índice de refracción es 1,6.

R.: $l = 39°$

7. Calcular el índice de refracción de una sustancia cuyo ángulo límite es de 32°.

R.: $n = 1{,}89$

8. Un rayo incide sobre una cara de un prisma de $n = 1{,}5$, con un ángulo de 30°; el ángulo del prisma es $A = 45°$. Aplicando dos veces la construcción gráfica del rayo refractado, trazar el camino del rayo.

9. Sobre el prisma anterior, un rayo de luz incide rasante sobre una de las caras. Trazar el camino recorrido por el rayo.

10. ¿Cuál deberá ser el ángulo de incidencia de un rayo que incide sobre un prisma de $n = 1{,}4$ y $A = 65°$, para que el ángulo de emergencia valga 90°?

R.: $i = 19°$

11. Trazar el camino que sigue un rayo de luz que incide sobre un prisma de $n = 1{,}8$ y $A = 40°$; repetir la construcción para otro prisma de la misma sustancia y de ángulo refringente $A = 60°$.

12. ¿Cuál es el índice de refracción de la sustancia de que está construido un prisma de $A = 46°$, si la desviación mínima vale 30°?

R.: $n = 1{,}57$

13. ¿Qué desviación mínima produce un prisma de $n = 1{,}6$ y $A = 40°$?

R.: $\delta_m = 26°$

14. ¿Qué índice de refracción deberá tener un prisma de $A = 45°$, para que a un rayo que incida con un ángulo de 90° corresponda un rayo emergente bajo un ángulo también de 90°?

R.: $n = 2{,}6$

15. El ojo de un observador está situado sobre una pecera, a 1,20 m de la misma. Sobre la misma vertical y a 0,80 cm por debajo del nivel del agua se encuentra el ojo de un pez. ¿A qué distancia de su ojo ve el observador al pez? ¿A qué distancia de su ojo ve el pez al observador?

R.: 1,80 m; 2,40 m

16. El ojo de un observador está a 1,20 m sobre la superficie de una cuba de agua ($n = 4/3$) cuyo fondo es un espejo plano horizontal. El espesor del agua es de 1 m. *a)* ¿Dónde ve su imagen el observador? *b)* ¿En qué sentido se desplaza esa imagen si se vuelca el agua de la cuba?

R.: 390 cm; la imagen se aleja 50 cm

17. Sean dos prismas idénticos de índice de refracción $\sqrt{2}$ cuyas secciones rectas son triángulos rectángulos A B C y A′ B′ C′; los ángulos A y A′ son rectos y los B y B′ miden 30°. Se los acopla de manera de formar un prisma único de ángulo de refringencia igual a 60°. ¿Cuál es el ángulo de incidencia para el cual se produce la desviación mínima? ¿Cuánto vale el ángulo de desviación mínima?

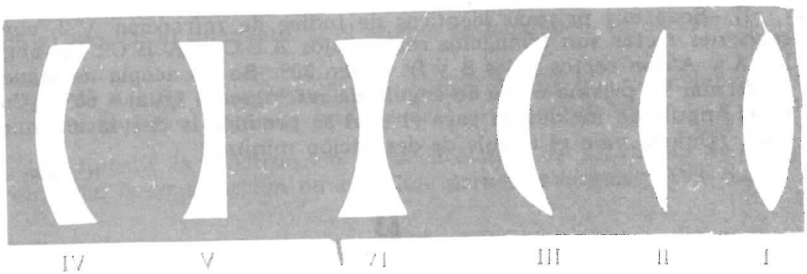
R.: 45°; 30°

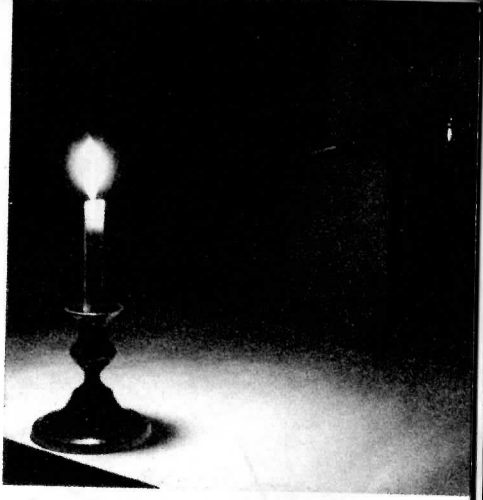
5 LAS LENTES

Una lente es un cuerpo transparente limitado por superficies esféricas*. Una de las caras puede ser plana.

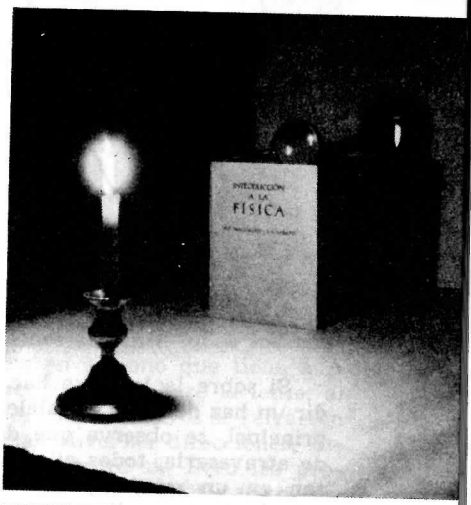
* No estudiaremos las lentes cuyas superficies limitantes no son esféricas, pues están fuera del nivel de este texto.

Las figuras representan cortes de distintas clases de lentes: I, biconvexa; II, plano-convexa; III, menisco convergente; IV, bicóncava; V, plano-cóncava; VI, menisco divergente. Las tres primeras son *convergentes*, y las tres últimas, *divergentes*.





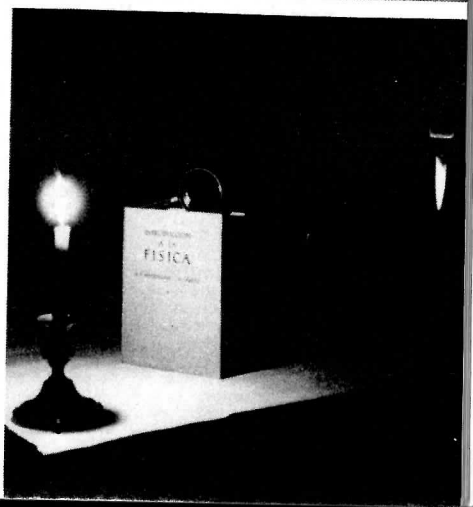
En las figuras de esta página se ven tipos de imágenes producidas por lentes. ¿Cómo explicar tal diversidad?



Las lentes convergentes

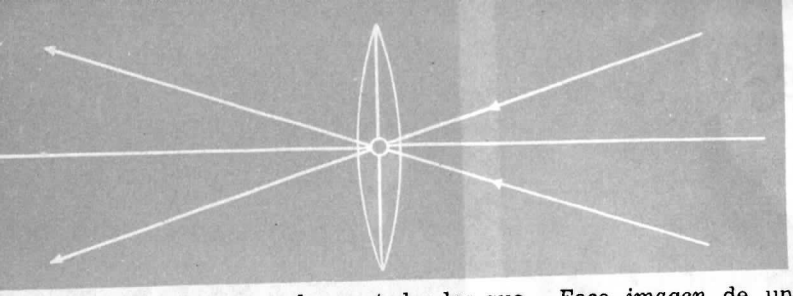
Eje principal

Es la recta determinada por los centros de las superficies esféricas que forman las caras de la lente.



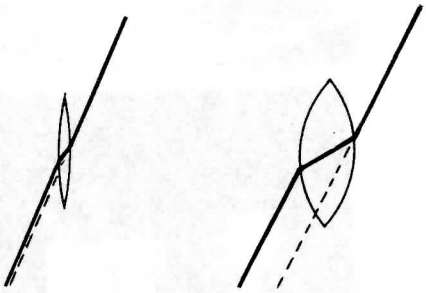
Centro óptico

Si se hace incidir sobre la lente un rayo de luz que coincida con el eje principal, la atraviesa sin desviarse. Pero no es el único rayo que tiene esa propiedad, pues



Los rayos que pasan por el centro óptico de una lente no se desvían.

lo mismo sucede con todos los que pasan por el punto O, llamado *centro óptico**.



Por qué sólo estudiamos lentes delgadas.

Focos

Si sobre la lente se hace incidir un haz de rayos paralelo al eje principal, se observa que después de atravesarla, todos ellos se cruzan en un mismo punto del eje principal, al que llamamos *foco*.

Cada lente tiene dos focos, pues la luz puede incidir tanto desde la izquierda como desde la derecha. *Foco objeto* de una lente es un punto del eje principal tal que todo rayo que pasa por él emerge de la lente paralelo al eje principal. *Foco imagen* de una lente es el punto del eje principal donde se concentran los rayos que llegaron paralelamente al eje principal. En las lentes convergentes, y suponiendo que la luz viene desde la izquierda, el foco imagen está a la derecha de la lente y el foco objeto a la izquierda.

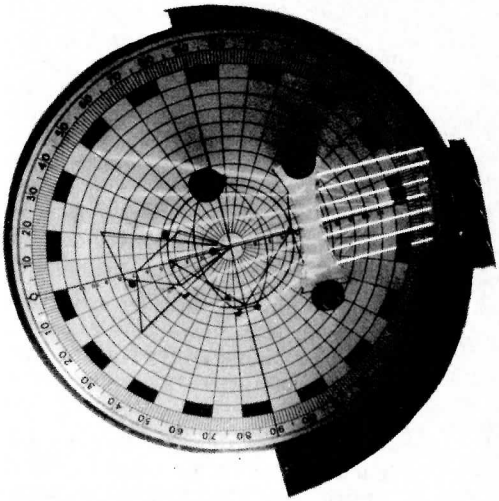
Distancia focal

Es la distancia entre el foco de la lente y su centro óptico. La representaremos con la letra *f*.

CÓMO MEDIR LA DISTANCIA FOCAL. Los rayos del Sol son paralelos entre sí; si un haz de rayos incide paralelamente al eje principal de una lente, todos ellos concurren en el foco. Si en ese punto colocamos un papel, se quema, pues en ese solo punto se ha concentrado toda la cantidad de calor que recibe la superficie de la lente. La distancia desde la lente hasta el papel es la distancia focal.

* Nos limitaremos a estudiar lentes delgadas, que son aquellas cuyo espesor es mucho menor que su diámetro. En las lentes gruesas, los rayos que pasan por el centro óptico sufren desplazamientos comparables a los producidos por láminas de caras paralelas.

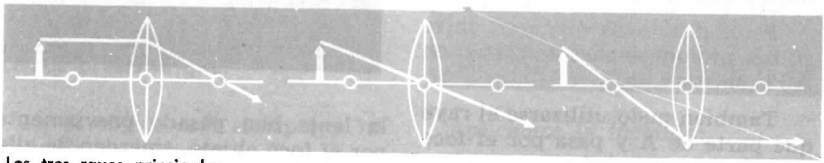
Los tres rayos principales



La figura muestra un disco de Hartl, al que se ha adosado un corte de una lente convergente. Un haz de luz atraviesa varias ranuras, y al iluminar la superficie del disco, los rayos se hacen visibles al observador.

1) *Un rayo paralelo al eje principal atraviesa la lente y luego pasa por el foco imagen.*

2) *Un rayo que pase por el centro óptico atraviesa la lente sin desviarse.*



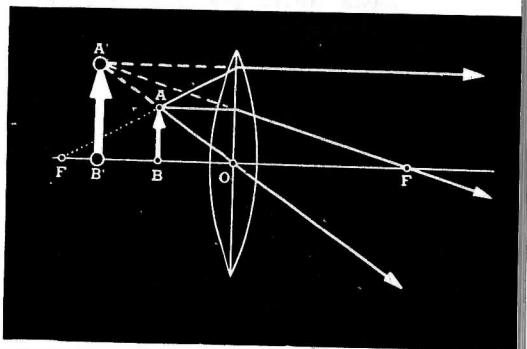
Los tres rayos principales.

3) *Un rayo que pase por el foco objeto atraviesa la lente y emerge de ella paralelamente al eje principal.*

Estos tres tipos de rayos se llaman *rayos principales*, y ellos permiten explicar las diversas clases de imágenes que mostramos antes, así como también obtener cualquier clase de imagen.

Construcción de imágenes

1) *El objeto se encuentra entre la lente y el foco.* El objeto es el punto A, y nuestro propósito es hallar su imagen. De A salen infinitos rayos de luz, y de ellos inciden sobre la lente todos los contenidos en el cono que tiene a A por vértice y por base la lente; al atravesarla, esos rayos se refractan y toman diversas direcciones, divergentes entre sí. Pero las prolongaciones de todos los rayos refractados concurren en un mismo punto A', que es la imagen de A. Debemos determinar el punto A', conociendo A y la distancia focal de la lente.



Como todos los rayos que han atravesado la lente pasarán por A', basta conocer la dirección de dos de ellos para determinar su intersección, pues en esa intersección está A'. De la enorme mayoría de los rayos no conocemos la dirección que tomarán después de atravesar la lente, pero de tres de ellos sí: son los tres rayos principales.

Tracemos, pues, el rayo que parte de A e incide paralelamente al eje principal; luego de atravesar la lente, el rayo pasará por el foco imagen.

Tracemos después el rayo que parte de A e incide sobre el centro óptico. Ese rayo seguirá su camino sin desviarse.

Estos dos rayos divergen entre sí; sus prolongaciones se cortan en A', la imagen de A.

También pudo utilizarse el rayo que parte de A y pasa por el foco objeto, pero basta con dos rayos para determinar la posición de A'.

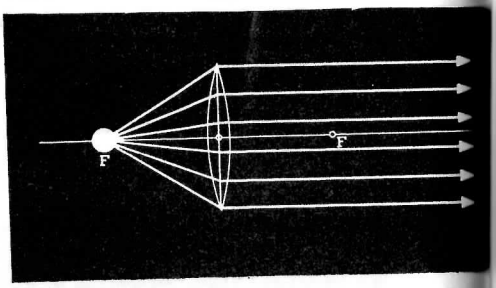
Conociendo A se puede conocer la dirección que seguirá cualquier rayo que parta de A y atraviese la lente, pues su prolongación ha de pasar por A'.

Si se trata de hallar la imagen de un segmento de recta como el A B, perpendicular al eje principal, admitiremos que su imagen es otro segmento de recta perpendicular al eje principal, de modo que para hallar B' teniendo A', basta trazar por éste la perpendicular al eje principal, hasta cortarlo en B'.

En el caso explicado, como la imagen está formada no por los mismos rayos refractados, sino por sus prolongaciones, diremos de ella que es *virtual*; además, es *derecha* y de *mayor tamaño* que el objeto.

Éste es el tipo de imágenes que se obtienen cuando se usa una lente convergente como lupa.

2) *El objeto está colocado en el foco.* Imaginemos una lamparita eléctrica colocada en el foco. Como todos los rayos que llegan a



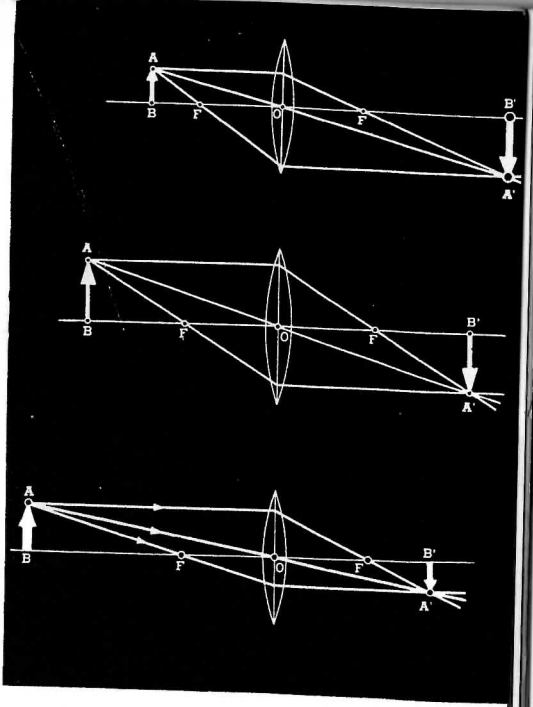
la lente han pasado previamente por el foco objeto, emergen de ella paralelamente al eje principal, de modo que ni ellos ni sus prolongaciones se cortan. En este caso no hay imagen. También suele decirse que la imagen está en el infinito.

Así ocurre en las linternas, en los faros de automóviles, etc., es decir, cuando se trata de que no se disperse el haz de luz emergente, para llegar así a gran distancia.

3) *El objeto está colocado entre f y 2f.* Empleando los rayos principales se ubica la imagen, que ahora es *real*, *invertida* y de *mayor tamaño* que el objeto.

4) *El objeto está a la distancia 2f.* La imagen es *real*, *invertida* y de *igual tamaño* que el objeto.

5) *El objeto está a una distancia mayor que 2 f.* La imagen es *real, invertida* y de *menor tamaño* que el objeto.



Cálculo de la posición de la imagen

Como para los espejos esféricos, se demuestra que

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'}$$

Para aplicar esta fórmula tendremos presente que:

1) el objeto está siempre a la izquierda de la lente;

2) para una lente convergente, siempre $f > 0$;

3) $x' > 0$ cuando la imagen está a la derecha de la lente (imagen *real*), y $x' < 0$ cuando la imagen está a la izquierda de la lente (imagen *virtual*).

EJEMPLOS: *Con una lente convergente se obtiene una imagen real a 10 cm de la lente, de un objeto colocado a 50 cm de la misma. Calcular la distancia focal.*

Aplicamos la fórmula:

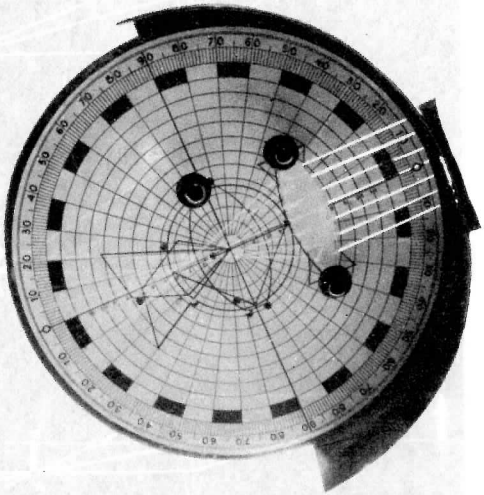
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{50\text{ cm}} + \frac{1}{10\text{ cm}} = \frac{10\text{ cm} + 50\text{ cm}}{500\text{ cm}^2} = \frac{60}{500\text{ cm}}$$

Luego:

$$f = \frac{500\text{ cm}}{60} = 8{,}3\text{ cm}$$

Con la lente del problema anterior se quiere obtener una imagen de modo que $x' = 15$ cm. ¿A qué distancia se debe colocar el objeto?

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'} \therefore \frac{1}{x} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x'} = \frac{1}{8{,}3\text{ cm}} - \frac{1}{15\text{ cm}} = \frac{15 - 8{,}3}{15 \cdot 8{,}3\text{ cm}} = \frac{6{,}7}{124{,}5\text{ cm}} \therefore x = \frac{124{,}5\text{ cm}}{6{,}7} \cong 18{,}6\text{ cm}$$



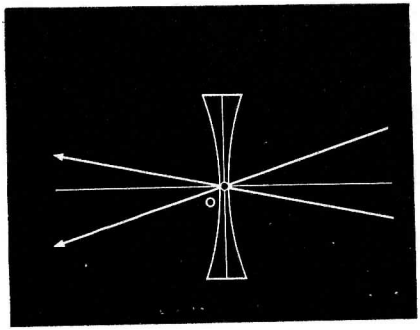
Las prolongaciones de todos los rayos que llegaron paralelos al eje principal, pasan por el foco virtual imagen.

Las lentes divergentes

Eje principal

Es la recta determinada por los centros de las superficies esféricas que forman las caras.

Los rayos que pasan por el centro óptico no se desvían.



Centro óptico

Es el punto que goza de la propiedad de que todo rayo que pasa por él atraviesa la lente sin desviarse.

Focos

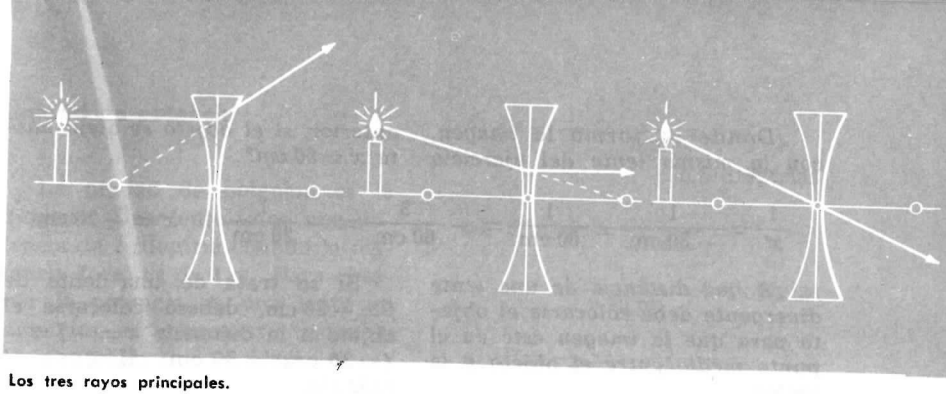
Si se hace incidir sobre la lente un haz de rayos paralelos al eje principal, al atravesar la lente se desvían y divergen entre sí, pero de tal modo que las prolongaciones de los rayos refractados se cortan en un mismo punto del eje principal, llamado *foco imagen.*

También las lentes divergentes tienen dos focos. Si sobre la lente se hace incidir un haz de rayos convergentes, de modo que emerjan de la lente paralelos al eje principal, las prolongaciones de todos los rayos incidentes se cortan en un mismo punto del eje principal, al que llamamos *foco objeto.*

Construcción de imágenes

Caso único. Las lentes divergentes sólo producen un tipo de imagen: *virtual, derecha* y de *menor tamaño* que el objeto. Para la construcción de una imagen cualquiera se usan también, como en las lentes convergentes, los tres rayos principales:

1) *Un rayo que incida sobre la lente paralelamente al eje principal, emerge de ella en forma tal que su prolongación pasa por el foco imagen.*



Los tres rayos principales.

2) *Un rayo que incida sobre la lente y pase por el centro óptico, la atraviesa sin desviarse.*

3) *Un rayo que incida sobre la lente de modo que su prolongación pase por el foco objeto, emerge de ella paralelamente al eje principal.*

La posición de la imagen

La distancia a que se formará la imagen en la lente se calcula con una fórmula análoga a la empleada para lentes convergentes:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'}$$

pero en el caso de las lentes divergentes debe recordarse que:

1) La distancia focal es siempre negativa ($f < 0$).

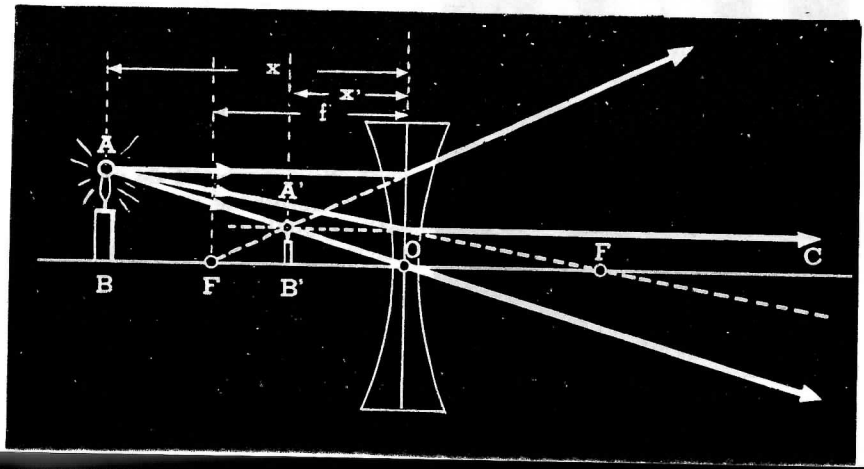
2) La distancia del objeto a la lente (x) y la distancia de la imagen a la lente (x') tienen siempre signos opuestos.

EJEMPLOS: *Con una lente divergente de distancia focal $f = -30$ cm se forma la imagen de un objeto colocado a $x = 20$ cm. ¿A qué distancia de la lente se forma la imagen?*

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'} \quad \therefore \quad \frac{1}{x'} =$$

$$= \frac{1}{f} - \frac{1}{x} = \frac{1}{-30\text{ cm}} - \frac{1}{20\text{ cm}} =$$

$$= \frac{1}{12\text{ cm}} - \quad \therefore \quad x' = -12\text{ cm}$$



¿Dónde se forma la imagen, con la misma lente del ejercicio anterior, si el objeto se aleja hasta $x = 60$ cm?

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{-30\text{ cm}} - \frac{1}{60\text{ cm}} = -\frac{3}{60\text{ cm}} = -\frac{1}{20\text{ cm}} \quad \therefore \; x' = -20\text{ cm}$$

¿A qué distancia de una lente divergente debe colocarse el objeto para que la imagen esté en el punto medio entre el objeto y la lente?

Téngase presente que, como las distancias desde el objeto y desde la imagen hasta la lente llevan siempre signos opuestos:

$$x' = -\frac{1}{2}x$$

resulta que:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{x} + \frac{1}{-\frac{x}{2}} =$$

$$= -\frac{1}{x} \quad \therefore \; x = -f$$

Una mano vista a través de una lente de aumento.

Si se trata de una lente de $f = -30$ cm, deberá colocarse el objeto a la distancia $x = -f = -(-30\text{ cm}) = 30$ cm. Hágase el cálculo.

¿A qué distancia máxima de la lente podrá formarse una imagen?

Obsérvese en los ejercicios anteriores, que la imagen se aleja de la lente al mismo tiempo que el objeto. La imagen más lejana se formará pues, para la posición más lejana del objeto, es decir, cuando el objeto esté en el infinito. Pero si el objeto está en el infinito, los rayos que llegan a la lente son paralelos entre sí, de modo que la imagen se formará a una distancia de la lente igual a la focal.

Esta misma conclusión se puede obtener mediante el cálculo. En efecto, para $x = \infty$, se tiene:

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\infty} =$$

$$= \frac{1}{f} - 0 = \frac{1}{f} \quad \therefore \; x' = f$$

Potencia de una lente

Se llama *potencia* de una lente a la recíproca de su distancia focal. En símbolos:

$$P = \frac{1}{f}$$

Unidad de potencia

La unidad de potencia es la *dioptria*. Una lente tiene una potencia de 1 dioptria cuando la distancia focal es de 1 m. Para obtener la potencia de una lente en dioptrias, se expresa su distancia focal en metros y se calcula su recíproca.

EJERCICIO: *Calcular en dioptrias las potencias de las siguientes lentes:* a) $f = 2$ m; b) $f = 25$ cm; c) $f = -40$ cm; d) $f = -5$ m.

a) $P = \frac{1}{f} = \frac{1}{2\text{ m}} = 0{,}5$ dioptrias

b) $P = \frac{1}{f} = \frac{1}{25\text{ cm}} = \frac{1}{0{,}25\text{ m}} = 4$ dioptrias

c) $P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-40\text{ cm}} = -\frac{1}{-0{,}4\text{ m}} = -2{,}5$ dioptrias

d) $P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-5\text{ m}} = -0{,}2$ dioptrias.

Problemas

1. Con una lente convergente se obtiene una imagen real a 5 cm de la lente, de un objeto colocado a 25 cm de la misma. Calcular la distancia focal.

R.: 4,1 cm

2. Con la lente del problema anterior se coloca un objeto a 9,3 cm. ¿A qué distancia se forma la imagen?

R.: 7,5 cm

3. ¿A qué distancia de una lente convergente de 15 cm de distancia focal, sobre su eje, debe colocarse un punto luminoso para que su imagen real se produzca a doble distancia? fdem su imagen virtual.

R.: 45 cm; — 15 cm

4. ¿A qué distancia de una lente convergente de 30 cm y sobre su eje principal debe colocarse un punto luminoso para que su imagen real se forme a 1,30 m del mismo?

R.: Hay dos soluciones posibles: 46,9 cm y 83,03 cm

5. Una lente convergente de distancia focal 100 mm da de un objeto P situado sobre el eje principal una imagen P′ situada a 5,1 m de la lente. 1) ¿A qué distancia se encuentra el objeto?; 2) Si el objeto mide 24 mm, ¿cuánto mide la imagen, si se desea obtener del P una imagen de 7,20 m de longitud sobre una pantalla situada a 24 m de P, calcular la distancia focal de la nueva lente que debe emplearse?

R.: 102 mm; 1,02 m; 80 mm

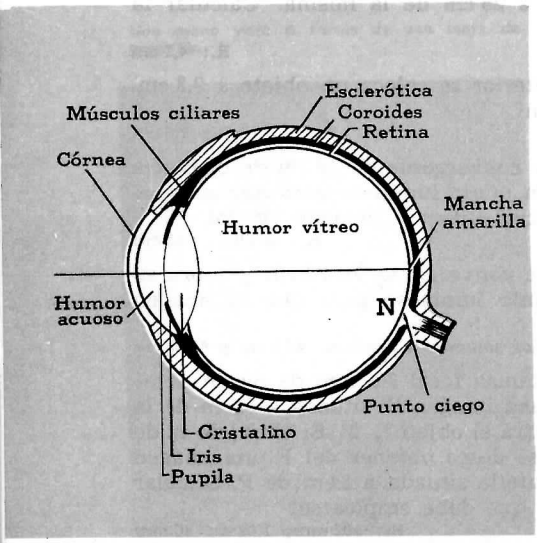
6 INSTRUMENTOS DE ÓPTICA

El ojo humano

Ligera descripción

El ojo humano es aproximadamente esférico, poseyendo un diámetro de unos 25 mm. La membrana exterior, que recubre la casi totalidad del ojo, se llama *esclerótica*; es dura y de color blanco (el blanco del ojo). En la parte anterior está interrumpida para dejar lugar a la *córnea transparente*.

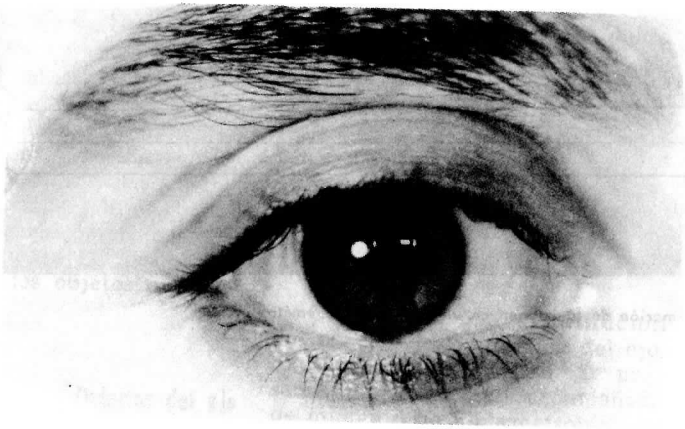
Esquema del ojo con sus partes.



A la esclerótica, hacia adentro, sigue la membrana *coroides*, de color negro, que es la que hace del ojo una verdadera cámara oscura.

A la coroides le sigue la *retina*, que es la parte del ojo sensible a la luz. No toda la retina tiene la misma sensibilidad; hay una zona de sensibilidad máxima, a la que, por su color, se le llama *mancha amarilla*. La sensibilidad disminuye a medida que se consideran puntos más alejados de la mancha amarilla. Hay, además, una zona en donde la sensibilidad es nula. Es el llamado *punto ciego*, lugar donde el nervio óptico entra en el globo ocular.

En el interior del globo del ojo, y siguiendo el camino desde la córnea hacia el interior, se encuentra el *humor acuoso*, llenando la cavidad limitada por la córnea y el *cristalino*. Éste es una lente convergente, que proyecta las imágenes en la retina. El cristalino está



Fotografía de un ojo humano.

sujeto por los *músculos ciliares*, y por la parte de adelante tiene el *iris*, especie de diafragma, que puede aumentar o disminuir su diámetro para regular la cantidad de luz que entra en el ojo. La abertura del iris se llama *pupila*.

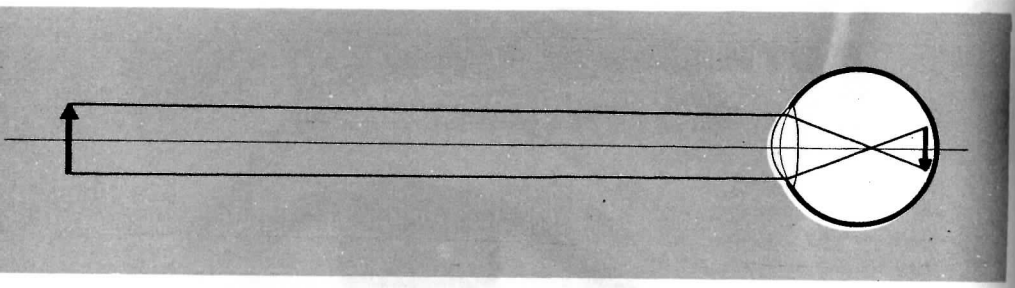
Por último, la cavidad que sigue al cristalino está ocupada por un líquido transparente llamado *humor vítreo*

El proceso de la visión

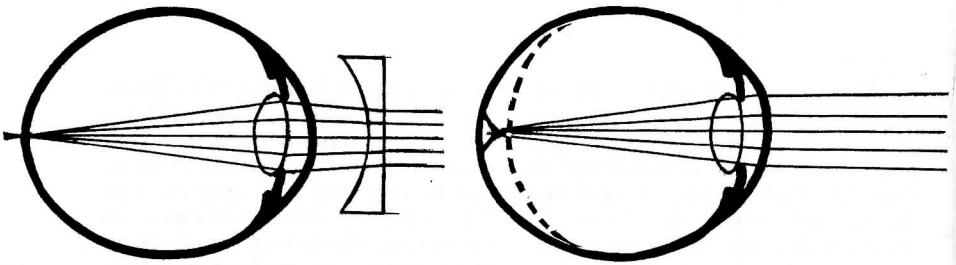
El ojo humano es un sistema óptico bastante complicado; nosotros nos limitaremos a suponer que se cumple una sola refracción en el cristalino.

La distancia focal del cristalino es tal que las imágenes, siempre reales, en todos los casos se forman sobre la retina. ¿Cómo es posible esto, si la distancia de la imagen a la lente varía de acuerdo con la ubicación del objeto, y el ojo es capaz de percibir con igual nitidez los objetos lejanos como los cercanos? Es que el cristalino no es una lente rígida, sino elástica. Los músculos ciliares modifican su curvatura, con lo cual su distancia focal varía; de modo que, cualquiera sea la distancia a que se halle el objeto, la imagen se forma siempre en la retina. Esta propiedad del ojo se llama *poder de acomodación*.

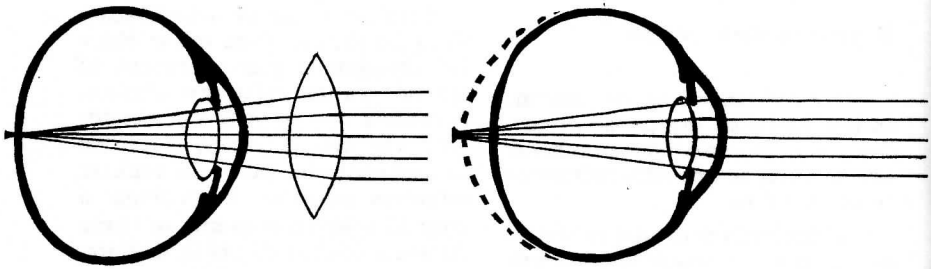
Pero ese poder de acomodación tiene un límite. Para mirar objetos ubicados a gran distancia, el ojo no realiza esfuerzo alguno. A medida que se observan objetos cada vez más cercanos, el ojo se va acomodando, pero sin realizar esfuerzos sensibles, hasta llegar a unos 25 ó 30 cm, a la que se llama *distancia óptima de visión distinta*. Para objetos más cercanos, y hasta unos 15 cm, el ojo puede aún acomodarse y formar las imágenes sobre la retina, aunque para objetos



Formación de la imagen en un ojo normal o emétrope.



Formación de la imagen en un ojo miope y su corrección.



Formación de la imagen en un ojo hipermétrope y su corrección.

colocados a menos de 15 cm, el ojo no puede acomodarse.

En el ojo normal, o *emétrope*, las imágenes se forman sobre la retina. Como en ésta se encuentran los elementos nerviosos sensibles a la luz, la imagen los impresiona. Esa impresión es conducida por el nervio óptico hasta el cerebro, el que la elabora y nos hace percibir los objetos que miramos.

Defectos del ojo

Miopía

La miopía consiste en un *alargamiento* del globo del ojo. Esto hace que la retina se encuentre detrás del lugar donde debiera formarse la imagen. La imagen así formada carece de nitidez, como una fotografía fuera de foco.

Para corregir la miopía se usan anteojos de lentes divergentes, con lo cual se aumenta la distancia focal del sistema lente-ojo, ubicándose así la imagen sobre la retina.

Hipermetropía

Es el defecto opuesto a la miopía: consiste en un *acortamiento* del ojo, con lo cual la retina queda delante del sitio donde se forma la imagen; como en el caso anterior, ésta resulta sin nitidez. La hipermetropía se corrige con lentes convergentes.

Presbicia

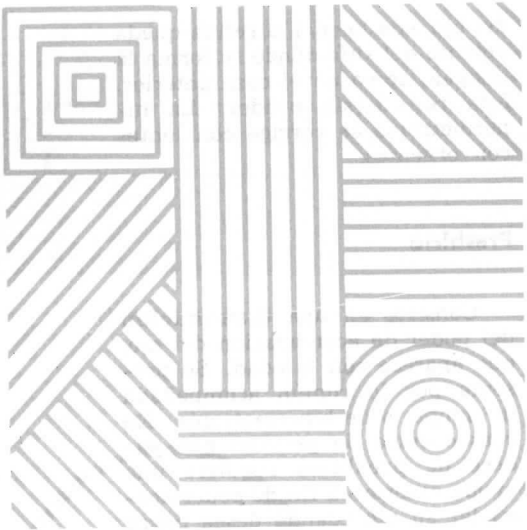
Consiste en una disminución del poder de acomodación del ojo, que aparece con la edad. Se presenta por lo común acompañada de miopía o de hipermetropía. En consecuencia, la persona que padece de presbicia requiere una ayuda exterior, a fin de poder acomodar su ojo cuando desea mirar de lejos o de cerca. Necesita, pues, dos pares de anteojos.

Para evitarlos se fabrican puliendo en el mismo cristal una zona con distancia focal menor, para leer o mirar de cerca.

Astigmatismo

Consiste en una imperfección del ojo –una diferencia entre sus diámetros vertical y horizontal, perpendiculares al eje óptico– que reduce igualmente la nitidez de las imágenes. Por ejemplo, si se observan las divisiones de una regla

Un astigmático ve confusas y hasta dobles las líneas verticales (o bien las horizontales) y nítidas las horizontales (o bien las verticales).

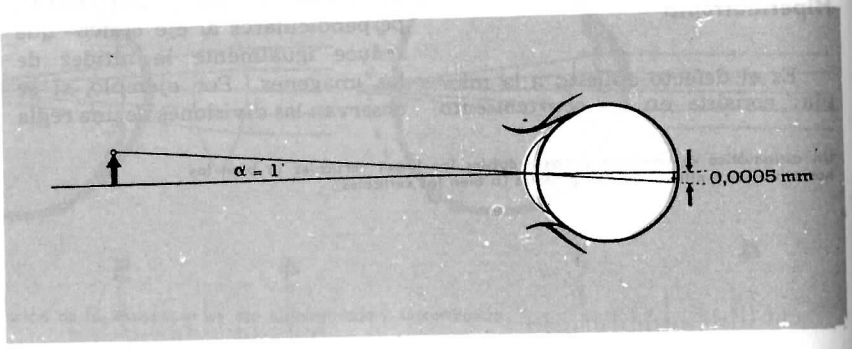


Simple prueba para astigmatismo. Todas las líneas no aparecen igualmente nítidas a una persona con este defecto.

graduada en medios milímetros, y las rayas se colocan horizontalmente, se las ve con toda nitidez; pero si se las coloca verticalmente, la imagen de cada raya no es nítida, y hasta puede parecer doble. Según el diámetro deformado, pueden verse con mayor nitidez las rayas verticales, o bien las horizontales.

Poder separador del ojo

Los elementos de la retina sensibles a la luz están separados, unos de otros, en aproximadamente 0,005 mm. Si un objeto está tan alejado que su imagen resulta muy pequeña, tanto que toda ella no ocupe más superficie que la de un elemento nervioso, es claro que el ojo percibirá el objeto solamente como un punto; el ojo no podrá dar de ese objeto ningún detalle, y sólo podrá proveerlos cuando la imagen impresione por lo menos dos elementos nerviosos, es decir, cuando su tamaño sea mayor que 0,005 mm. Para poder distinguir un punto de otro es necesario que las imágenes que de ellos nos da el ojo estén separadas entre sí más de 0,005 mm. Para que ello se produzca, los rayos que parten de cada punto deben formar entre sí un ángulo α tal que su tangente valga



$$\text{tg } \alpha = \frac{0{,}005 \text{ mm}}{15 \text{ mm}} \cong 0{,}0003$$

(siendo 15 mm la distancia del cristalino a la mancha amarilla).

Esto significa que el ángulo que forman los rayos, es:

$$\alpha \cong 1'$$

Ángulo de separación

Es el menor ángulo que pueden formar dos rayos luminosos para incidir sobre dos elementos sensibles diferentes. Como hemos visto, su valor es más o menos de 1'.

Cuanto mayor sea ese ángulo, menor será el poder del ojo para ver separados dos puntos. Por ello se da la siguiente definición.

Poder separador

Es la recíproca del ángulo de separación.

Como aproximadamente

$$\alpha = \frac{0{,}005 \text{ mm}}{15 \text{ mm}}$$

resulta:

Poder separador =

$$= \frac{1}{\frac{0{,}005}{15}} = 3\,000$$

Si se multiplica la distancia entre dos puntos por el poder separador del ojo, se obtiene la máxima distancia a la cual el ojo ve esos puntos separados uno del otro.

EJEMPLO: *Si se tienen dos puntos separados por una distancia de 1 mm, ¿cuál es la mayor distancia a la cual el ojo los ve separados?*

$$d = 1 \text{ mm} \cdot 3\,000 = 3\,000 \text{ mm} = 3 \text{ m}$$

A mayor distancia de 3 m, los dos puntos impresionan al ojo en un mismo elemento nervioso, y el ojo los ve como uno solo.

Persistencia de las imágenes

Cuando un rayo de luz hiere la retina, la sensación luminosa que produce perdura, aún después que el rayo ha cesado de llegar al ojo, aproximadamente durante 1 décimo de segundo.

Esta particularidad de la retina es fácilmente observable. En efecto: si en un cuarto oscuro se mueve rápidamente un cigarrillo encendido, haciéndole describir una circunferencia, el ojo no percibe un punto luminoso, sino toda la circunferencia. Lo propio ocurre cuando los niños hacen girar "luces de Bengala" encendidas.

El movimiento que se aprecia en el cinematógrafo es posible por esa persistencia de las imágenes en la retina. En la pantalla se proyecta una imagen que se mantiene durante un tiempo muy breve (aproximadamente 0,04"), aunque suficiente para que impresione la retina. Luego es reemplazada por otra, mientras que en el ojo persiste aún la anterior, y así sucesivamente; de modo que para el ojo esa sucesión produce el efecto de un movimiento continuado.

Por lo general, en las películas cinematográficas se proyectan 24 cuadros por segundo.

La lupa

Es una lente convergente, de pequeña distancia focal (entre 5 y 10 cm).

Un químico investigador observa el estuche de vidrio del tensiómetro interfacial. La gota, tal como se la ve a través de la lupa, informa acerca de la tensión interfacial del aceite del que está compuesta.

Se la usa colocando el objeto entre el foco y la lente, de modo que la imagen es *virtual, derecha y mayor que el objeto.*

Aumento eficaz

Es el cociente entre la longitud de la imagen que se forma en la retina cuando al objeto se lo observa con lupa, y la de la imagen que se forma cuando se lo observa sin ella.

Cuando se quiere observar un objeto a ojo descubierto, con la mayor cantidad posible de detalles, debe colocárselo a unos 30 cm, que es la distancia óptima de visión distinta.

Análogamente, cuando se usa una lupa se gradúa la distancia, de modo que la imagen por observar esté también a la distancia óptima de visión distinta.

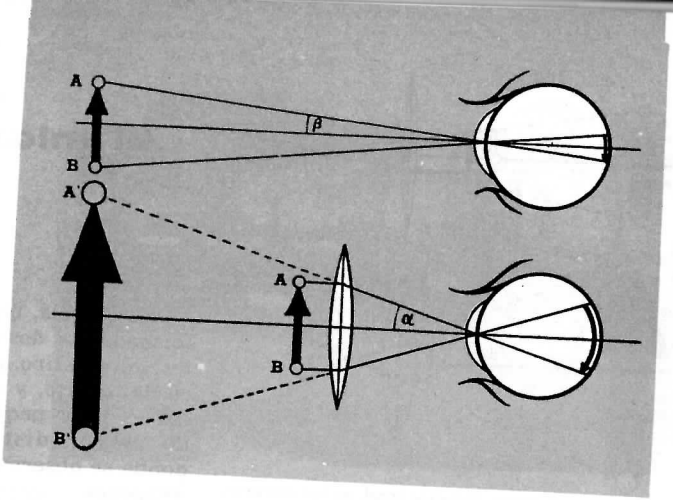
Cumpliéndose las condiciones antedichas, se puede decir que *el aumento eficaz es el cociente entre la longitud de la imagen que da la lupa y la longitud del objeto:*

$$\text{Aumento eficaz:} \quad A = \frac{A'B'}{A\ B}$$

De las figuras resulta también que

$$A = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}$$

o sea, que *el aumento eficaz de una lupa es el cociente entre las tangentes de los ángulos bajo los cuales se ven la imagen y el objeto, cuando se los observa a la distancia óptima de visión distinta.*



Aumento eficaz de una lupa.

Distancia focal y aumento eficaz

Admitamos que el ojo está colocado en el foco imagen de la lupa. En ese caso, se ve que

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{A'B'}{d} \qquad (d = 30\ \text{cm})$$

Como $A'\overset{\triangle}{B'}F' \sim R\overset{\triangle}{S}F'$, resulta

$$\frac{A'B'}{RS} = \frac{d}{f},$$

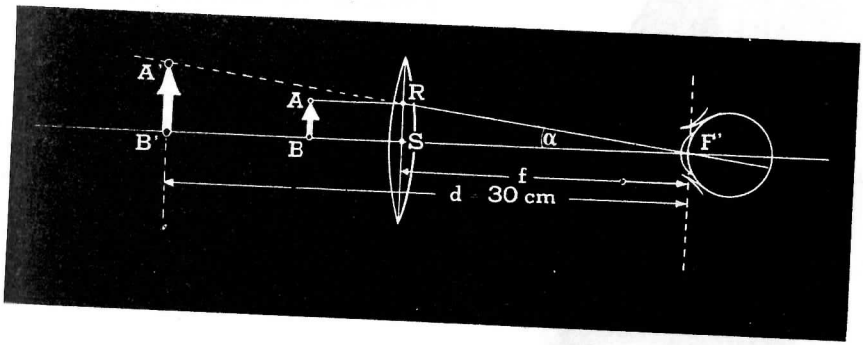
y como $RS = AB$,

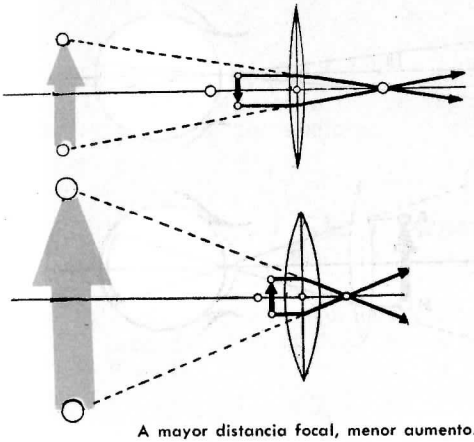
$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{d}{f}$$

Recordemos que el aumento $A = \dfrac{A'B'}{AB}$. De modo que, admitiendo que la distancia óptima de visión distinta sea de 30 cm, para calcular el aumento eficaz de una lupa basta dividir 30 cm por su distancia focal medida en cm: $A = \dfrac{30}{f}$.

EJEMPLO: *Si la distancia focal de una lupa es f = 10 cm, al observar una imagen formada a 30 cm del ojo, y colocado éste en el foco imagen (es decir, a 10 cm de la lente), el aumento eficaz es:*

$$A' = \frac{30\ \text{cm}}{10\ \text{cm}} = 3$$





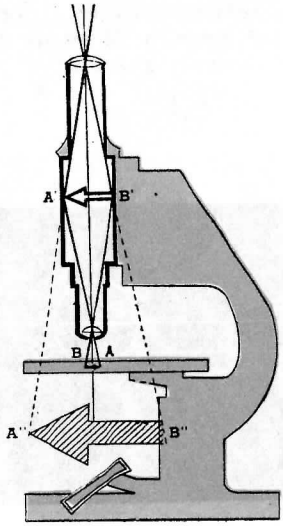
A mayor distancia focal, menor aumento.

Es decir, el objeto se ve α 3 veces más grande.

OBSERVACIÓN: Si se observa con una lupa de menor distancia focal, por ejemplo $f = 5$ cm, el aumento es doble del anterior:

$$A' = \frac{30 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} = 6$$

De modo que *el aumento eficaz es inversamente proporcional a la distancia focal.*



El microscopio

En esencia, un microscopio está formado por dos lentes convergentes: el *objetivo*, que se coloca cerca del objeto, y cuya distancia focal es muy pequeña, y el *ocular*, de mayor distancia focal, por donde se observa, para percibir las imágenes.

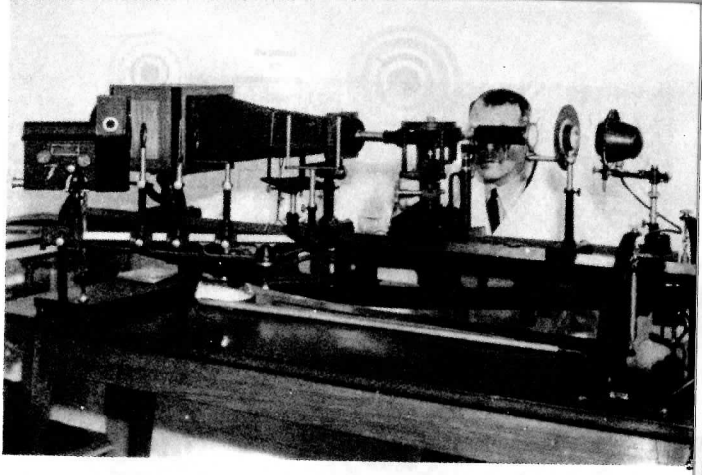
El objeto se coloca de modo que su distancia al objetivo sea mayor que la distancia focal de éste. Se obtiene así una imagen *real, invertida y mayor que el objeto* (A' B').

Esta imagen proporcionada por el objetivo funciona para el ocular como si fuera un objeto. Es decir: el ocular sirve para mirar el "objeto" A' B', como se lo haría con una lupa. El ocular da entonces una imagen A" B", que es la que se ve.

Aumento del microscopio

Para observar bajo distintos aumentos, un microscopio tiene siempre un juego de objetivos y otro de oculares. En cada uno de ellos viene indicado un número con el que es muy sencillo saber bajo qué aumento se está observando. Por ejemplo: si se emplea un objetivo que lleva el número 50 y un ocular con el número 10, el aumento es el producto de ambos números, es decir, 500. Si con un objetivo 30 se emplea un ocular 10 el aumento vale entonces 300.

Moderno microscopio metalográfico.



Fotomicrografía de una probeta de latón cuya composición es de 70 % de cobre y 30 % de cinc.

No basta con el aumento

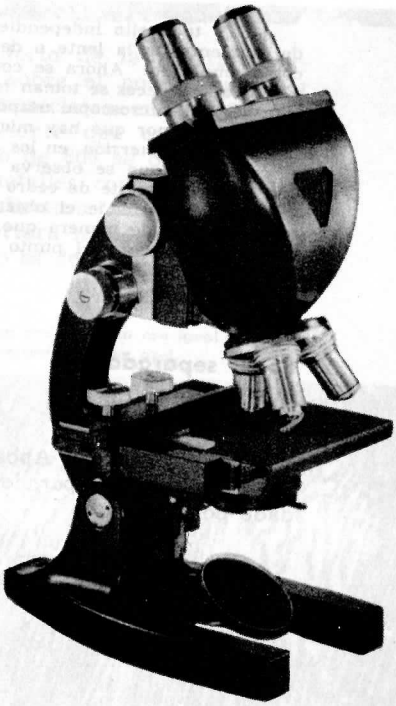
Más adelante hablaremos sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, pero digamos desde ahora que una de sus consecuencias es que la imagen de un punto formado por una lente no es un punto sino un disco rodeado de anillos claros y oscuros. El radio del disco y los de los anillos dependen de tres factores, y se verifica experimentalmente (y también se demuestra teóricamente) que:

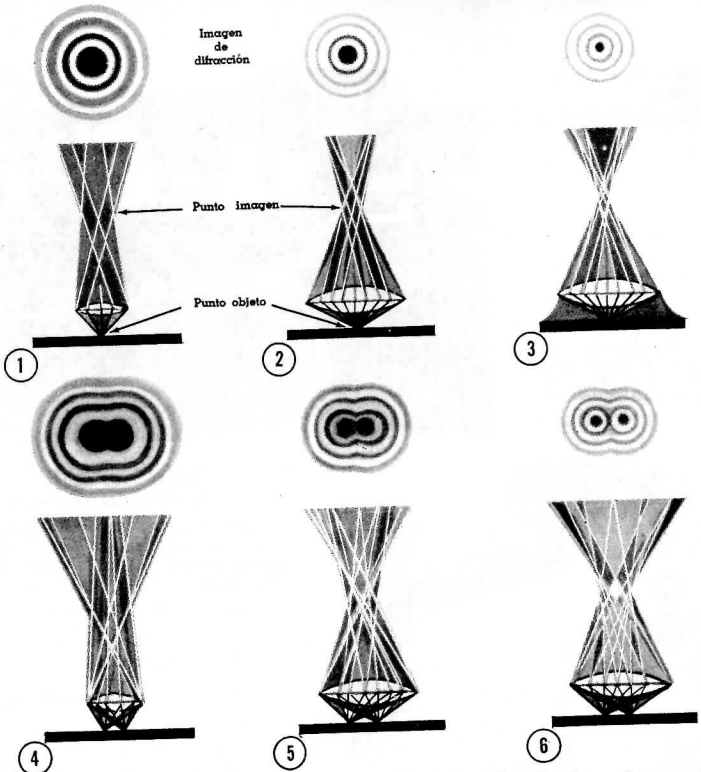
1) *cuanto mayor es el radio de la lente, menor es el radio del disco;*

2) *cuanto más azul es la luz empleada . . . menor es el radio del disco;*

3) *cuanto mayor es el índice de refracción del medio donde está sumergido el punto objeto . . . menor es el radio del disco.*

Microscopio binocular.





¡...Y todo ello independientemente del aumento de la lente o del microscopio empleado! Ahora se comprenderá por qué a veces se toman fotografías a través del microscopio usando luz ultravioleta; o por qué hay microscopios, llamados de *inmersión*, en los que sobre el preparado que se observa se coloca una gotita de aceite de cedro ($n = 1{,}5$), y luego se desciende el objetivo hasta tocar la gota, de manera que el medio entre el objetivo y el punto objeto es el aceite.

Poder separador del microscopio

El óptico alemán Abbe demostró que el *poder separador*, S, está dado por

$$S = \frac{\lambda}{2n \operatorname{sen} \alpha}$$

donde λ está relacionado con el color de la luz (es la longitud de onda), n es el índice de refracción, y α es el ángulo señalado en la figura.

El poder separador es la distancia más próxima a que pueden estar dos puntos para ser distinguidos; si se los acerca un poco más, ya no se distinguen y sólo se los ve como un solo punto. El producto $n \operatorname{sen} \alpha$ se llama *abertura numérica* del objetivo.

EJEMPLO: Un objetivo tiene una abertura numérica $A = 1$. ¿Cuál es su poder separador cuando trabaja con luz roja ($\lambda_1 = 0{,}8\ \mu$), y cuál es cuando lo hace con luz violeta ($\lambda_2 = 0{,}4\ \mu$)?

$$S_1 = \frac{0{,}8\ \mu}{2 \cdot 1} = 0{,}4\ \mu \qquad S_2 = \frac{0{,}4\ \mu}{2 \cdot 1} = 0{,}2\ \mu$$

Es decir, que cuando se trabaja con luz roja, el objetivo forma imágenes separadas hasta de puntitos separados por

Arriba): Fotomicrografía de una probeta observada con un aumento de 600 y una abertura numérica de 0,25. Abajo): La misma probeta observada con un aumento de 600 y una abertura numérica de 0,40. Podrá advertirse cómo en ésta hay más detalles que en la fotomicrografía anterior.

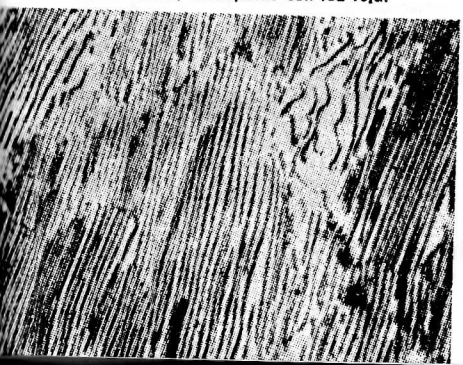
0,4 μ; pero no distingue entre dos puntitos separados, por ejemplo, 0,3 μ, cualquiera sea el aumento del objetivo. En cambio, empleando el mismo objetivo, pero iluminando con luz violeta, se tendrán imágenes separadas de los dos puntitos.

Pero no basta con que el objetivo los distinga; nuestro ojo debe verlos separados. Sean los dos puntos del ejemplo anterior, separados 0,3 μ. Si el aumento del objetivo es 100, los centros de los discos imágenes estarán separados $0{,}3\ \mu \cdot 100 = 30\ \mu$. Con el ocular observamos esos discos, y para que el ojo los vea separados sus imágenes deben formarse sobre distintos elementos nerviosos *. Si el ocular tiene aumento 6, por ejemplo, las imágenes que nuestro ojo observa (producidas por el ocular) estarán separadas $30\ \mu \cdot 6 = 180\ \mu$. Como el poder separador del ojo es 3 000, y como él observa generalmente imágenes formadas a 25 cm (distancia óptima de visión distinta), la menor separación para que las distinga es $25\ \text{cm}/3\,000 = 0{,}008\ \text{cm} = 80\ \mu$. Por lo tanto, distinguirá las imágenes dadas por el ocular porque están separadas 180 μ. Obsérvese que si el aumento del ocular fuera 2 y no 6, el ojo no vería separados los dos puntos, aunque sus imágenes lo estén. Por otra parte, si los dos puntos objeto estuvieran separados menos de 0,2 μ, aunque pasáramos del aumento $100 \cdot 6 = 600$ que hemos usado en el ejemplo, a otro mucho mayor, los puntos no se verían separados sino como uno solo.

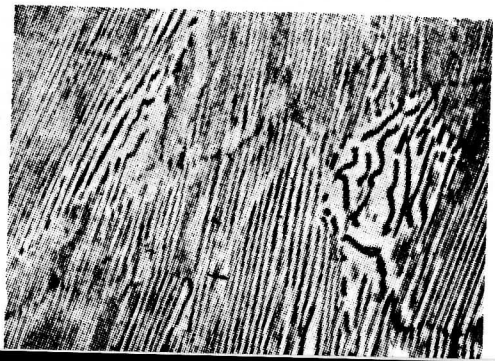
El efecto de la abertura numérica sobre el poder separador puede apreciarse en las figuras. Se advierte que con el mismo aumento de 600 se observan mayores detalles con objetivos de mayor abertura numérica. La mayor abertura numérica que se ha obtenido es de 1,60.

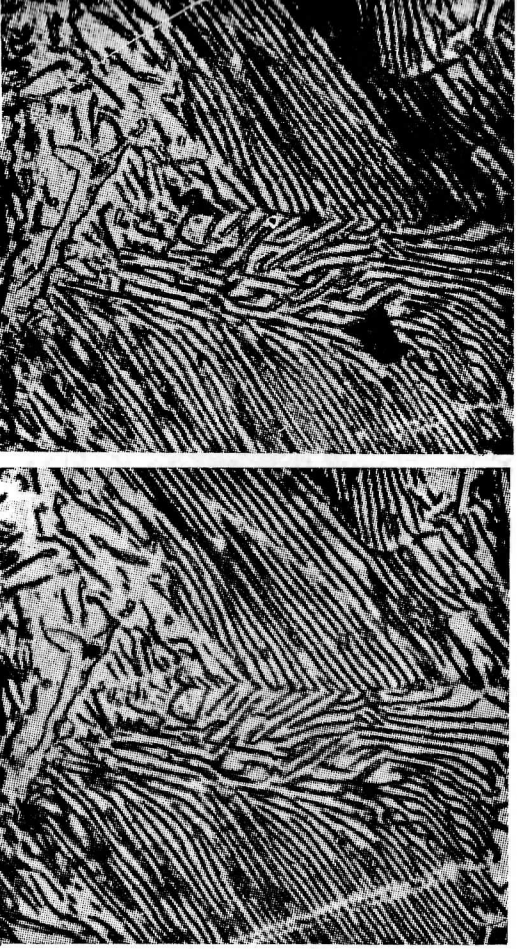
* Ver pág. 78.

Fotomicrografía de una probeta observada con 1 700 aumentos, trabajando con luz roja.



La misma probeta vista con igual aumento, pero iluminada con luz azul.





Arriba): Fotomicrografía de una probeta observada con un aumento de 1 500 e iluminada con luz verde. Abajo): La misma probeta observada con el mismo aumento, pero iluminada con luz ultravioleta. Puede verse cómo en ésta hay más detalles que en la fotomicrografía anterior.

También las figuras ilustran sobre los resultados que se obtienen con luces de diferentes longitudes de onda. Así, puede notarse que trabajando con luz azul se observan más detalles que con luz roja. Sin embargo no se percibe una ventaja apreciable hasta que se trabaja con luz ultravioleta. Pero si se emplea luz ultravioleta debe tenerse en cuenta que: 1) La luz ultravioleta es invisible, por lo que la imagen no podrá ser observada directamente, sino que es necesario fotografiarla; 2) Como la luz ultravioleta es absorbida por el vidrio común, el objetivo y el ocular deberán ser fabricados con cuarzo, que es transparente a la luz ultravioleta.

Por lo tanto, si se trabaja con la luz de menor longitud de onda posible (luz ultravioleta de 0,000 002 mm) y el objetivo de mayor abertura numérica: (N. A = 1,60), resulta que la *menor* distancia que puede separar a dos puntos para que puedan ser observados por un microscopio óptico es

$$S = \frac{\lambda}{2\,N.A} = \frac{0{,}000\,002\ mm}{2 \cdot 1{,}6} = 0{,}000\,001\,2\ mm$$

En consecuencia: si se trabaja con un microscopio óptico no hay ninguna esperanza, cualquiera sea el aumento que se emplee, de separar puntos que disten menos de 0,000 001 2 mm.

Usos del microscopio

Es muy conocido el empleo del microscopio en biología, botánica, zoología, etc. Para tales fines, se coloca la muestra a observar sobre un vidrio transparente –llamado portaobjeto– que se cubre con otro vidrio también transparente, el cubreobjeto, y se ilumina el conjunto desde abajo. Por lo tanto, la observación se realiza por *transparencia*.

Pero también el microscopio tiene gran importancia en el estudio de los metales. Si se quiere observar microscópicamente un metal, se procede de la siguiente manera: la muestra a observar se pule cuidadosamente, hasta obtener una superficie casi especular. Luego se la ataca con un reactivo adecuado –por ejemplo, ácido nítrico– que depende del metal que se observa y de lo que se desea observar. Por último, se ilumina la muestra por *reflexión*. La observación enseña entonces muchas y muy valiosas características del metal.

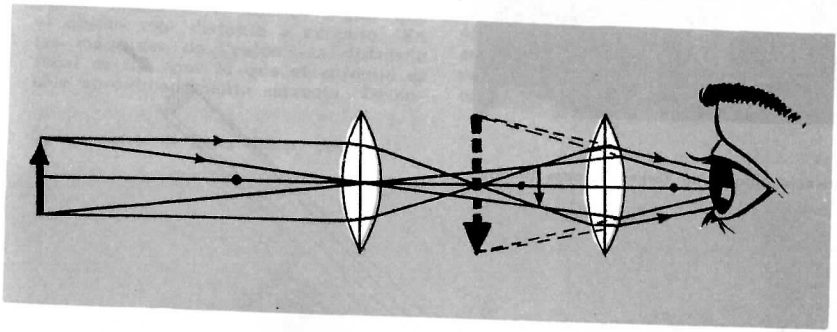
Juan Képler.

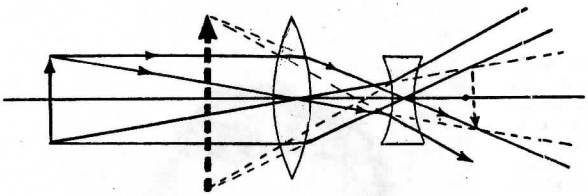
Anteojo astronómico de Képler

Consta, como el microscopio, de un objetivo y un ocular, pero el objetivo es de distancia focal muy grande (varios metros).

Permite observar astros u objetos lejanos, pero invierte las imágenes.

Esquema del anteojo astronómico de Képler.



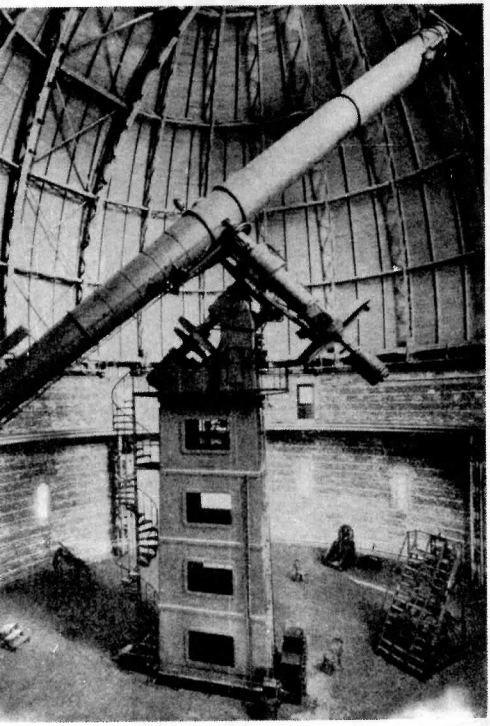


Esquema del anteojo de Galileo.

Anteojo terrestre de Galileo

A Galileo se debe el primer instrumento de observación. El ocular de su anteojo era una lente divergente. Actualmente se construyen binoculares de ese sistema, de poco aumento, por ejemplo para teatro.

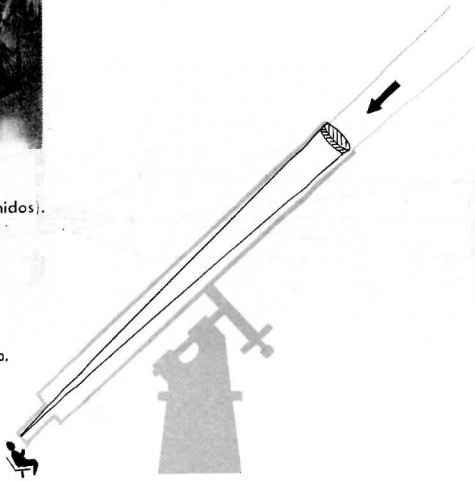
Sus principales ventajas son: 1) la construcción es sencilla; 2) son pequeños. Sus desventajas: 1) producen deformaciones de importancia; 2) el aumento no puede ser muy grande.



Telescopio gigante de Yerkes (Estados Unidos).

Fotografía

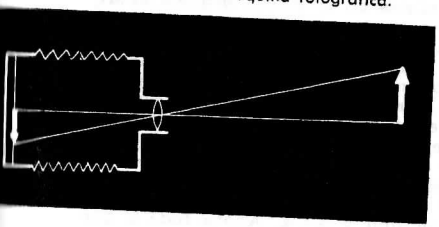
Fotografiar significa literalmente "grabar con luz". Para realizarlo se requiere: *a)* un elemento sensible a la acción de la luz (placa o película), y *b)* un dispositivo para dirigir la luz sobre el elemento sensible. En la cámara



Cómo se observa por un telescopio.

Cámara fotográfica.

Esquema de la máquina fotográfica.



fotográfica moderna todo esto se consigue con un mínimo de espacio y sencillez y un máximo de eficacia. La máquina consta de una lente convergente como *objetivo*, que produce del objeto a fotografiar una imagen real sobre la película. Para que esta imagen sea nítida la lente se acerca o se aleja de la placa –mediante el fuelle– según que el objeto esté distante o cercano. En las máquinas de "cajón" la distancia focal es fija, por lo que el enfoque es sólo aproximadamente correcto. Delante del objetivo se encuentra un diafragma que puede abrirse o cerrarse a voluntad, con lo que se regula la cantidad de luz que llega a la placa.

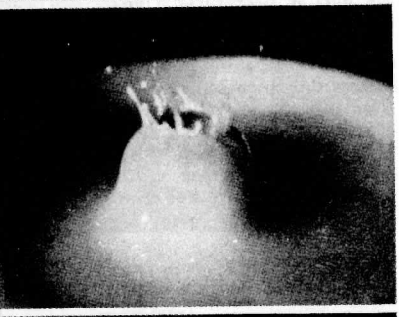
Como se ve, una máquina fotográfica es muy parecida, como sistema óptico, al ojo humano. El cristalino hace de objetivo, la retina de "película". El ojo también tiene su diafragma, y su enfoque se realiza, como hemos visto, variando el radio de curvatura del cristalino.

Serie completa de lentes Nikkor. Japón.

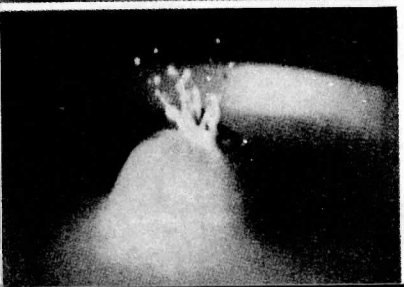
1

2

3



4



5

La placa está recubierta con una capa de gelatina que tiene en suspensión millones de cristalitos de bromuro de plata, que son los elementos sensibles a la luz. Cuando se fotografía, los cristalitos sobre los cuales incide la luz sufren una transformación química que, sin embargo, no es visible a simple vista. Pero cuando lo sometemos a la acción de un *revelador* (una sustancia química adecuada, como la hidroquinona), los granitos afectados por la luz se vuelven negros, mientras que el revelador no actúa para nada en los lugares donde no hubo luz. Se obtiene así el *negativo*, que es una fotografía de aspecto peculiar: todas las cosas que fueron claras en la escena original aparecen oscuras, y viceversa, todas las oscuras se nos aparecen claras. Claro que todavía hay que tener mucho cuidado en no exponer el negativo a la luz, porque entonces se impresionaría inmediatamente el resto de la placa ("velado" de la placa). Para evitarlo, hay que *fijar* la imagen, lo que se logra mediante otro baño que tiene la propiedad de hacer que la gelatina deje de ser sensible a la luz. Ahora, todo lo que hay que hacer para obtener una fotografía satisfactoria es fotografiar el negativo, es decir, obtener el *positivo*. Ello se realiza colocando el negativo adosado a una cartulina o vidrio que lleva a su vez otra capa de gelatina sensible a la luz. Se lo expone a la luz de manera que ésta atraviese el negativo. Las partes oscuras del negativo dejan pasar menos luz que las claras, por lo que las partes del positivo correspondientes a las oscuras del negativo saldrán claras –porque les llega menos luz–, mientras las que corresponden a las claras saldrán oscuras, porque reciben más luz.

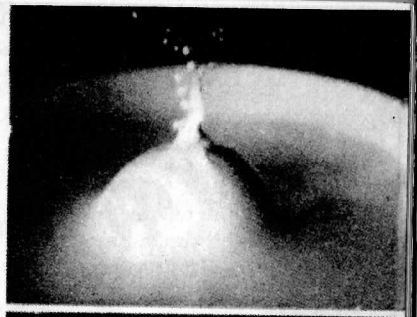
Cómo se fabrica la película fotográfica

En verdad, la parte más difícil de la fotografía es fabricar la película. Ésta consiste primero en una capa de una sustancia resistente, córnea, semejante al celuloide, que se lamina en hojas chatas y delgadas. La parte superior de estas hojas se recubre de emulsión de bromuro de plata en gelatina. Esta gelatina es exactamente la misma que solemos comer como postre, pero cuando se destina a la fotografía debe prepararse con mayor cuidado y limpie-

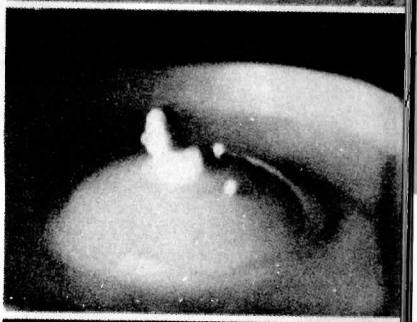
za. Se la fabrica con trocitos de piel de ternero, y sobre esto puede contarse una anécdota curiosa. Durante mucho tiempo los hombres de ciencia se vieron abocados al problema de que mientras algunas partidas de película eran sensibles a la luz, otras no lo eran. Al cabo de un tiempo descubrieron que las sensibles se habían fabricado con la gelatina sacada de los pellejos de los terneros cuyas madres habían comido mostaza silvestre en los campos, mientras que las no sensibles provenían de terneros cuyas madres no habían comido mostaza silvestre. Por supuesto, el problema no podía resolverse eligiendo los terneros, por lo que hubo que investigar qué cualidad poseía la mostaza que hacía sensible la gelatina, hasta que se descubrió que ello se debía al azufre; se fabricó entonces una sustancia con azufre, tan eficaz, que basta una gota de la misma para fabricar una tonelada de gelatina útil.

Cómo se fotografiaban nuestros bisabuelos . . .

Los mayores adelantos de la fotografía se han realizado en el terreno de obtener películas cada vez más sensibles. Hoy nos cuesta trabajo apreciar todos los progresos logrados en este terreno, pero conviene recordar cómo se fotografiaban nuestros bisabuelos. En esa época el que posaba para fotografiarse tenía que empolvarse la cara, para que reflejara luz suficiente como para impresionar la película en un tiempo razonable. Después tenía que sujetarse firmemente la cabeza en una especie de tornillo de carpintero que la sostuviera por detrás, para no moverla. Cuando todo estaba listo, el fotógrafo abría el obturador de su máquina. Entonces el "paciente" tenía que permanecer sentado y absolutamente quieto por espacio de veinte minutos . . .



6



7

8

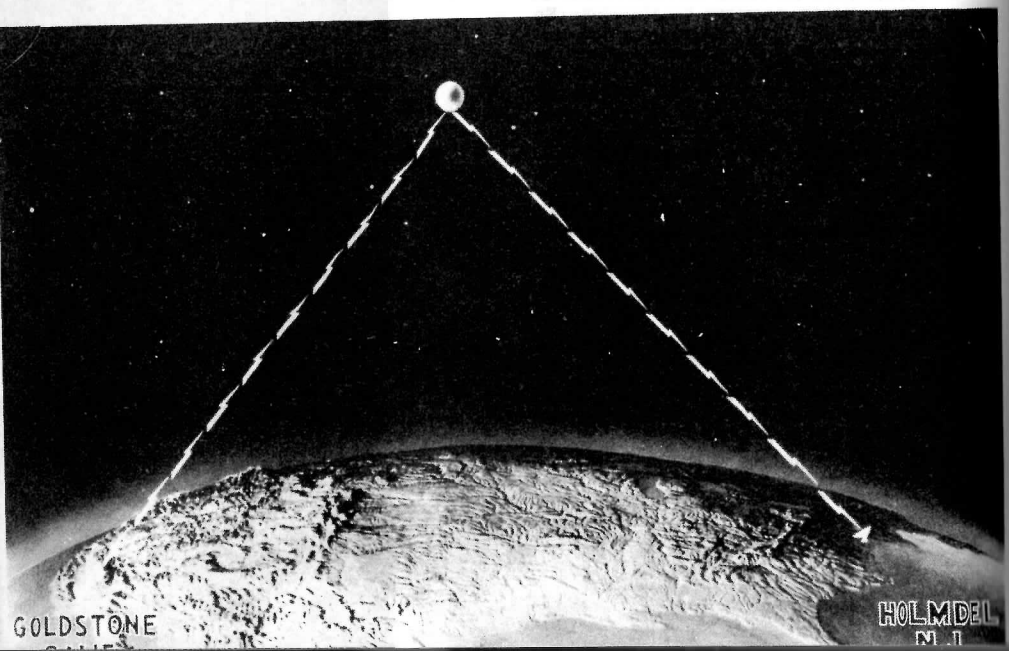
9

10

Maravillas de la fotografía. — La fotografía ultrarrápida permite obtener detalles insospechados de algunos fenómenos, como, por ejemplo, la formación de una burbuja. En la foto 1, una gotita de leche está a punto de chocar con la superficie del líquido; en la 2, se puede apreciar la formación de una corona de líquido. Obsérvese que la película de líquido tiende a ir hacia afuera. En las 3, 4, 5 y 6 se ve cómo actúa la tensión superficial, que "cierra la cúpula" en la foto 7. En las 8 y 9 el líquido "sobrante" se desliza de la burbuja, plenamente formada en la 10.

III

EL MUNDO DE LAS ONDAS



¿Qué es la luz? Misterio insondable...
Los hombres de ciencia han oscilado de una teoría
a otra, cada vez abandonando la anterior,
hasta llegar a la paradójica situación actual, en la que
tienen que aceptar dos teorías simultáneas:
¿onda o corpúsculo?, interroga el hombre de ciencia.
¡Onda y corpúsculo!, responde la luz.

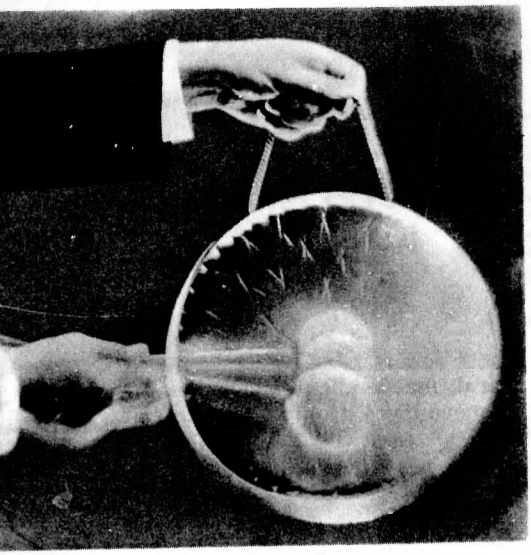
7 LAS ONDAS

No es exagerado decir que vivimos en un mundo en el que las ondas nos rodean por todas partes. Ondas sonoras, ondas luminosas, ondas de radio, onzas hertzianas, etc., son expresiones que pertenecen ya al lenguaje de todos los días. La televisión, la radiotelefonía y el radar son algunas de las muchas maravillas modernas que funcionan gracias a ondas. En este capítulo vamos a estudiar el comportamiento de las ondas en general: cómo se producen, cómo se propagan, cuáles son sus principales propiedades, cómo se afectan unas a otras cuando llegan simultáneamente a un mismo punto. Las conclusiones que obtendremos serán válidas para las ondas en general, independientemente del fenómeno físico (sonido, luz, etc.) al cual estén vinculadas.

Las ondas son portadoras de energía

Cuando se arroja una piedra en el agua tranquila de un estanque, se forman ondas circulares, con centro en el lugar donde cayó la

Ondas producidas por el choque de un objeto en el agua.



Propagación del sonido.

piedra. Cada onda es una circunferencia cuyo radio va aumentando paulatinamente, y si el estanque es suficientemente grande, irán agrandándose, hasta perderse poco a poco, como si su energía fuera disminuyendo a medida que se alejan de su origen.

Si hay objetos flotando, no son arrastrados por las ondas, sino que oscilan verticalmente en su lugar:

Las ondas se propagan sin arrastrar materia consigo.

Al hacer vibrar una cuerda se obtiene otro ejemplo de onda, en el que encontramos las mismas características observadas en el ejemplo anterior.

a) Partículas en un medio en el que se propaga una onda transversal. — b) Partículas en un medio en reposo. — c) Partículas en un medio en el que se propaga una onda longitudinal.

Las ondas transportan energía. Por eso pueden poner en movimiento a una hoja o un madero que flota en el agua; la energía transportada por una onda sonora es la que hace vibrar nuestros tímpanos. Podemos decir, pues, que:

Las ondas son portadoras de energía.

Dos observaciones. *a)* La vibración del agente perturbador puede ser de cualquier tipo. Para simplificar, supondremos que ese movimiento vibratorio es un movimiento oscilatorio armónico, tal como lo hemos estudiado *.

b) Debe observarse que el medio que utiliza la onda para propagarse ofrece resistencia a esa propagación, por lo cual las ondas atenúan paulatinamente su efecto, hasta desaparecer; el mayor o menor grado de absorción depende de la naturaleza del medio y de la energía de la onda. En nuestro estudio supondremos que no hay *amortiguación* de las ondas.

Clasificación de las ondas

Si se cuelga una pesa de un resorte, también se producen vibraciones, pero se advierte una diferencia con las ondas en el agua: en aquéllas, la partícula alcanzada por la onda adquiere un movimiento oscilatorio cuya dirección es perpendicular a la dirección en que se propagan las ondas, mientras que en el caso del resorte, cada partícula alcanzada por la perturbación adquiere un movimiento oscilatorio cuya dirección coincide con la dirección en que se propagan las ondas.

De acuerdo con esta diferencia, las ondas son de dos tipos:

Ondas transversales, en que la dirección del movimiento de cada partícula es perpendicular a la dirección en que se propaga la onda; y

Ondas longitudinales, en que la dirección del movimiento de cada partícula es la misma que la de propagación de la onda. Las ondas sonoras pertenecen a esta clase.

Propagación de onda longitudinal.

Movimiento de una partícula

Supongamos que cada partícula alcanzada por una onda vibra con movimiento oscilatorio armónico. Recordemos que su separación de la posición de equilibrio

* Véase Introducción a la Física, tomo I, pág. 245.

(o elongación) en cada instante (tomo I, pág. 245), se puede calcular con la fórmula:

$$x = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}$$

en la que x es la elongación en el instante t; r, la elongación máxima o amplitud; y T, el período. Esta fórmula es esencial para comprender todo lo que sigue, y para dejar bien sentada su significación, haremos el siguiente:

EJEMPLO: *Representar gráficamente el movimiento de una gota de agua que, al ser alcanzada por una onda, vibra con un período* $T = 0{,}6^s$ *y una amplitud* $r = 1$ *cm.*

Construimos una tabla de valores:

t: instantes $\qquad\qquad$ x: elongaciones

Para $t_0 = 0^s$ resulta

$$x_0 = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0}{0{,}6} = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 0 = 1 \text{ cm} \cdot 0 = 0 \text{ cm}$$

Para $t_1 = 0{,}05^s$ resulta

$$x_1 = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}05}{0{,}6} = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{6} = 1 \text{ cm} \cdot 0{,}50 = 0{,}5 \text{ cm}$$

Para $t_2 = 0{,}1^s$ resulta

$$x_2 = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}10}{0{,}6} = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} = 1 \text{ cm} \cdot 0{,}87 = 0{,}87 \text{ cm}$$

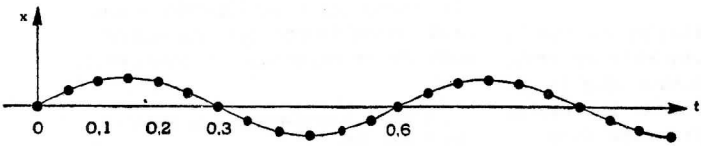
Para $t_3 = 0{,}15^s$ resulta

$$x_3 = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}15}{0{,}6} = 1 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} = 1 \text{ cm} \cdot 1 = 1 \text{ cm}$$

y calculando en forma análoga, se obtiene:

$t_4 = 0{,}20^s$	$x_4 = 0{,}87$ cm
$t_5 = 0{,}25^s$	$x_5 = 0{,}50$ cm
$t_6 = 0{,}30^s$	$x_6 = 0{,}00$ cm
$t_7 = 0{,}35^s$	$x_7 = -0{,}50$ cm
$t_8 = 0{,}40^s$	$x_8 = -0{,}87$ cm
$t_9 = 0{,}45^s$	$x_9 = -1{,}00$ cm
$t_{10} = 0{,}50^s$	$x_{10} = -0{,}87$ cm
$t_{11} = 0{,}55^s$	$x_{11} = -0{,}50$ cm
$t_{12} = 0{,}60^s$	$x_{12} = 0{,}00$ cm

Uniendo los puntos correspondientes a cada par de valores se obtiene una sinusoide, que representa las posiciones ocupadas por un punto alcanzado por la onda a medida que transcurre el tiempo. La curva nos permite calcular la posición que ocupará el punto en un instante prefijado; o bien, en qué instante el punto ocupará determinada posición.



La elongación en función del tiempo, de una partícula que vibra con un movimiento oscilatorio armónico de período $T = 0{,}6^s$ y amplitud $r = 1$ cm.

OBSERVACIÓN: No debe confundirse la representación gráfica de la elongación con la trayectoria descripta por el punto; ésta es un segmento de recta, que el punto recorre una y otra vez en ambos sentidos. Recuérdese que al estudiar la representación gráfica de las distancias recorridas por un móvil con movimiento rectilíneo uniformemente variado hicimos la misma advertencia: la representación gráfica es una parábola, pero la trayectoria es una recta.

Cómo se propaga una onda

Acabamos de ver cómo se mueve una partícula considerada independientemente de las demás en el medio por donde se propaga una onda. Veremos ahora cómo se vinculan entre sí los movimientos de las distintas partículas, es decir, cómo se propaga la onda en un medio determinado.

En un cierto instante, un punto P del medio comienza a vibrar con movimiento oscilatorio armónico.

Consideremos otro punto Q, a una distancia a de P. ¿Cuánto demorará la onda en llegar desde P hasta Q? El punto Q comenzará a vibrar un cierto tiempo Δt después de P. Si la velocidad de la onda es v, ese lapso Δt vale

$$\Delta t = \frac{a}{v}$$

Por lo tanto, el movimiento de Q está retrasado Δt segundos con respecto al de P; cuando Q comienza a vibrar, hace ya Δt segundos que P está vibrando; y lo que ocurre en P ocurre en Q, pero en éste ocurre Δt segundos más tarde.

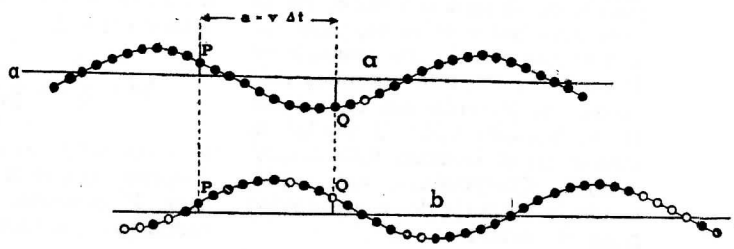
En el instante t, la elongación de P es

$$x_P = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}$$

¿Qué elongación tiene Q en ese mismo instante t? La misma que tenía P un lapso Δt antes, es decir, en el instante $t - \Delta t$:

$$x_Q = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t - \Delta t}{T}$$

EJEMPLO: *En P se produce un movimiento oscilatorio de amplitud $r = 2$ cm y período $T = 0{,}1''$, que se propaga con una velocidad*



a) Aspecto del medio de propagación en el instante t. — b) Aspecto del medio de propagación un lapso Δt más tarde.

$v = 10$ cm/s. El punto Q está a 3,6 cm de P. Calcular: a) cuánto tiempo después de haber comenzado a vibrar P comienza a vibrar Q; b) la elongación de P cuando la onda llega a Q; c) la elongación de P a los 0,37" de comenzar su vibración; d) la elongación de Q en ese instante; e) al cabo de cuánto tiempo Q tendrá la elongación que tiene P en el instante $t = 0{,}37$".

a) La onda tarda en llegar a Q

$$\Delta t = \frac{a}{v} = \frac{3{,}6 \text{ cm}}{10 \text{ cm/s}} = 0{,}36^{\text{s}}$$

b) La elongación de P, a los 0,36" de haber comenzado su movimiento, es

$$x = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T} = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2 \frac{0{,}36^{\text{s}}}{0{,}1^{\text{s}}} = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen}\ 7{,}2\,\pi \cong$$

$$\cong 2 \text{ cm} \cdot (-0{,}59) = -1{,}18 \text{ cm}$$

Cuando la onda llega a Q, el punto P está 1,18 cm por debajo de su posición de equilibrio.

c) A los 0,37", la elongación de P es

$$x_2 = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T} = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}37^{\text{s}}}{0{,}1^{\text{s}}} = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 7{,}4\,\pi =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot (-0{,}9511) \cong -1{,}90 \text{ cm}$$

d) En ese instante, la elongación de Q es

$$x' = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t - \Delta t}{T} = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}37^{\text{s}} - 0{,}36^{\text{s}}}{0{,}1^{\text{s}}} =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}01^{\text{s}}}{0{,}1^{\text{s}}} = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen}\ (2\,\pi \cdot 0{,}1) =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 0{,}2\,\pi = 2 \text{ cm} \cdot 0{,}59 = 1{,}18 \text{ cm}$$

En el instante en que se cumplen 0,37 segundos de haberse iniciado la perturbación en P, este punto está 1,90 cm por debajo de su posición de equilibrio, y Q está 1,18 cm por encima de ella.

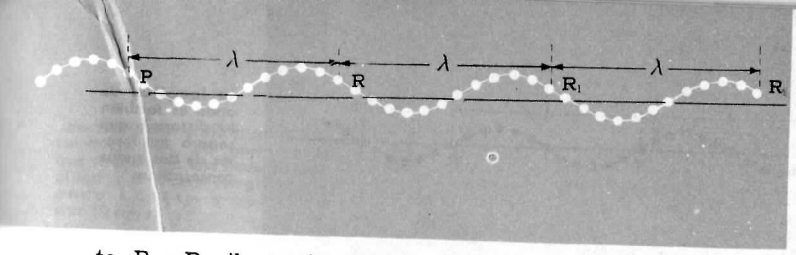
e) Para saber cuándo la elongación de Q será $-1{,}90$ cm, no es necesario hacer cálculos, pues sabemos que todo lo que acontece en P, sucede en Q 0,36 segundos más tarde. Si P tenía esa elongación en el instante 0,37", Q tendrá la misma en el instante $0{,}37^{\text{s}} + 0{,}36^{\text{s}} = 0{,}73^{\text{s}}$. Compruébese esto, aplicando la fórmula de la elongación para el instante $t = 0{,}73$".

La longitud de onda

Volviendo al ejemplo anterior, veamos cómo vibra un punto R que está a 1 cm de P, en la dirección en que se propagan las ondas. R comienza a vibrar Δt segundos después que P:

$$\Delta t = \frac{a}{v} = \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ cm/s}} = 0{,}1^{\text{s}}$$

pero como 0,1" es el período, en el instante en que R comienza a vibrar, P comienza a realizar otra oscilación, y a partir de ese instan-



La longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos que están en fase.

te, P y R vibran simultáneamente y ocupan posiciones análogas: si P está a 1,5 cm de su posición de equilibrio, por ejemplo, y se mueve hacia arriba, también R está a 1,5 cm de su posición de equilibrio, y moviéndose hacia arriba. En física se dice que ambos puntos *vibran en fase*, o que *están en fase*.

Siempre que dos puntos estén separados por una distancia igual a la que recorre la onda en un período, o a un múltiplo de ella, los dos puntos vibrarán en fase.

DEFINICIÓN: *Se llama longitud de onda la distancia recorrida por la perturbación en un período.* Se la representa con la letra griega λ (lambda), y de la definición resulta:

$$\lambda = v\,T$$

También podemos decir: la longitud de onda es la distancia que separa a dos puntos sucesivos que vibran en fase.

Relaciones entre las características de la onda y el movimiento oscilatorio de cada partícula

a) *El período.* A intervalos regulares, e iguales al período T, un punto alcanzado por las ondas vuelve a pasar por el mismo lugar con la misma velocidad y en el mismo sentido. Si en el instante $t = 0$ inicia su movimiento por haber sido alcanzado por una onda, T segundos más tarde pasa otra vez por su posición de equilibrio, moviéndose en el mismo sentido y con la misma velocidad que en el instante $t = 0$: la primera onda ha concluido de pasar. Pero a continuación llega la segunda onda y se reinicia el movimiento vibratorio del punto. El período T del movimiento de una partícula es, pues, el lapso que separa el pasaje por un mismo punto de dos ondas consecutivas. Por eso T es *también el período de las ondas.*

b) *La frecuencia. Se llama frecuencia, f, a la recíproca del período T.* En símbolos:

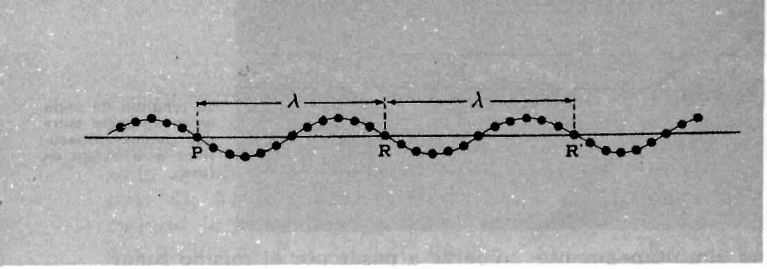
$$f = \frac{1}{T}$$

De lo dicho anteriormente se deduce que la frecuencia de las ondas es también la frecuencia del movimiento oscilatorio de cada partícula.

Observemos que si
en T segundos se realiza
1 oscilación,
en 1 segundo se realizan

$\frac{1}{T}$ oscilaciones; pero $\frac{1}{T} = f$

de modo que la frecuencia *representa el número de ondas que en 1 segundo pasan por un mismo punto. También representa el número de oscilaciones realizadas por el punto en 1 segundo.*



La longitud de onda es también la distancia que separa los frentes de dos ondas consecutivas.

c) *La amplitud.* La amplitud de las ondas es igual a la amplitud del movimiento de cada partícula.

d) *La longitud de onda.* En un lapso igual al período, una onda recorre una distancia que definimos como la longitud de onda. Pero podemos visualizar ese concepto de esta otra manera: si en un instante t llega una onda al punto P, éste es sacado de su posición de equilibrio y realiza una oscilación en un lapso T. Al cabo de ese tiempo, la onda ha terminado de pasar por P, y a este punto llega la onda siguiente. ¿A qué distancia de P está ya el frente de la primera onda?

De acuerdo con la definición, en el lapso T la onda recorrió una distancia igual a la longitud de onda, de modo que *longitud de onda es la distancia que separa los frentes de dos ondas consecutivas.*

EJEMPLOS: *El sonido "la" natural tiene una frecuencia $f = 435$ 1/s. Calcular la longitud de onda de ese sonido, si la velocidad del sonido en el aire es de 350 m/s.*

$$\lambda = v\,T = v\,\frac{1}{f} = \frac{350\ \text{m/s}}{435\ 1/\text{s}} = 0{,}805\ \text{m}$$

La longitud de onda de una luz anaranjada es de 6 000 Å. Calcular su frecuencia si se sabe que la velocidad de la luz es $v = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}\ \text{cm/s}}{6\,000\ \text{Å}} = \frac{3 \cdot 10^{10}\ \text{cm/s}}{6\,000 \cdot 10^{-8}\ \text{cm}} = 5 \cdot 10^{14}\ \frac{1}{\text{s}}$$

Es decir que se producen 500 billones de vibraciones por segundo.

La ecuación de una onda

La ecuación

$$x = r\ \text{sen}\ 2\,\pi\,\frac{t}{T}$$

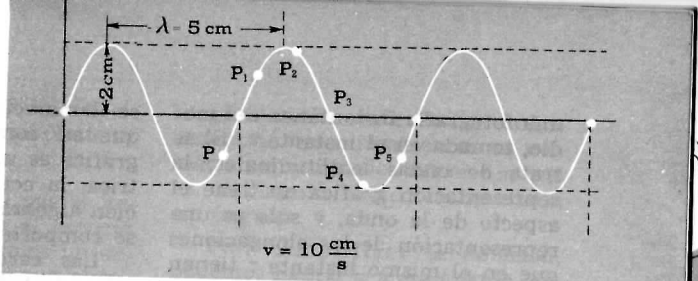
permite calcular la elongación de un punto al cabo de un tiempo t de haber sido alcanzado por una onda.

La ecuación

$$x = r\ \text{sen}\ 2\,\pi\,\frac{t - \Delta t}{T}$$

permite calcular la elongación en el mismo instante t, de otro punto que está a una distancia $a = v \cdot \Delta t$ del anterior.

Esta última ecuación se puede escribir de otra manera mucho más expresiva:



epresentación gráfica, en el instante $t = 0{,}3^s$, del medio en el que se propaga una onda de amplitud $r = 2$ cm, longitud de onda $\lambda = 5$ cm y velocidad $v = 10$ cm/s.

$$\Delta t = \frac{a}{v} \therefore x =$$

$$= r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t - a/v}{T} =$$

$$= r \operatorname{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{v\,T} \right)$$

y como $v\,T = \lambda$:

$$\boxed{x = r \operatorname{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{\lambda} \right)}$$

EJEMPLO: *Consideremos ondas de amplitud $r = 2$ cm que se propagan en el agua con una velocidad $v = 10$ cm/s, y cuya longitud es $\lambda = 5$ cm. Fijemos nuestra atención en un punto P que es alcanzado por las ondas, y calculemos su elongación al cabo de $t = 0{,}3^s$ de haber entrado en vibración.* Para ello usamos la ecuación en su primera forma:

$$x = r \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}$$

Previamente debemos calcular el período T.

$$\lambda = v\,T \therefore T = \frac{\lambda}{v} =$$

$$= \frac{5 \text{ cm}}{10 \text{ cm/s}} = 0{,}5^s$$

Luego,

$$x = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{0{,}3^s}{0{,}5^s} =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 1{,}2\,\pi =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot (-0{,}588) = -1{,}176 \text{ cm}$$

Calculemos las elongaciones de los puntos P_1, P_2, P_3, P_4 y P_5, que están respectivamente a 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm y 5 cm más allá de P, en la dirección de propagación de las ondas. Para ello usamos la última forma de la ecuación de las ondas:

$$x_1 = r \operatorname{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{\lambda} \right) = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \left(\frac{0{,}3}{0{,}5} - \frac{1 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right) =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi\,(0{,}6 - 0{,}2) = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen}\,(2\pi \cdot 0{,}4) =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 0{,}8\,\pi = 2 \text{ cm} \cdot 0{,}809 = 1{,}618 \text{ cm}$$

$$x_2 = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi \left(0{,}6 - \frac{2 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right) = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 2\pi\,(0{,}6 - 0{,}4) =$$

$$= 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen}\,(2\pi \cdot 0{,}2) = 2 \text{ cm} \cdot \operatorname{sen} 0{,}4\,\pi = 2 \text{ cm} \cdot 0{,}951 = 1{,}902 \text{ cm}$$

Y calculando análogamente se obtiene:

$x_3 = 0$ cm $\qquad x_4 = -1{,}902$ cm

$x_5 = -1{,}176$ cm

En abscisas, llevamos las distancias a P, y en ordenadas, las correspondientes elongaciones. Con un número suficiente de puntos se obtiene la curva de la figura.

Si se trata, como en nuestro ejemplo, de ondas transversales, la representación gráfica es como

una fotografía instantánea del medio, tomada en el instante t. Si se trata de ondas longitudinales, la representación gráfica no tiene el aspecto de la onda, y sólo es una representación de las elongaciones que en el mismo instante t tienen los distintos puntos alcanzados por la onda.

Fotografía instantánea y cinematográfica de una onda

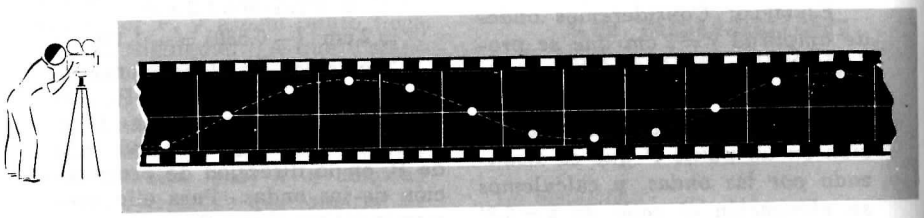
La ecuación

$$x = r \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a}{\lambda}\right)$$

se llama ecuación de la onda, porque así como la representación gráfica es una descripción geométrica, la ecuación es una descripción algebraica de cómo es y cómo se comporta la onda.

Las características fundamentales de todo movimiento ondulatorio se expresan en esta forma:

1) *Es un fenómeno que se repite periódicamente en el tiempo.* En efecto: si consideramos un punto (lo que significa atribuirle a a un valor fijo), y consideramos distintos instantes (es decir, hacemos variar t), obtendremos la representación gráfica del movimiento que la onda le provoca a ESE punto. Es el movimiento que hemos descripto en la pág. 96.



Cuando en la ecuación de la onda se mantiene fijo el valor a y se hace variar el de t, se contempla el fenómeno desde el punto de vista de un operador que *cinematografía* una misma partícula en las distintas posiciones al transcurrir el tiempo.

Cuando en la ecuación de la onda se mantiene fijo el valor de t y se hace variar el de a, se contempla el fenómeno desde el punto de vista de un fotógrafo que toma una instantánea de todas las partículas del medio en las posiciones que ocupan en el instante t.

Procediendo así, *es como si cinematografiáramos el movimiento de una partícula.*

2) *Es un fenómeno que se repite periódicamente en el espacio.* En efecto: si consideramos un determinado instante (lo que significa atribuir a t un valor fijo), y consideramos distintos puntos (es decir, hacemos variar a a), obtendremos la representación gráfica del medio perturbado por la onda, tal como se lo encuentra en el instante t (ejemplo de pág. 100).

Procediendo así, *es como si tomáramos una fotografía instantánea del medio, en ese instante t.*

Por estos dos aspectos, explícitamente expuestos en la última forma de la ecuación de la onda, se dice que *el movimiento ondulatorio es doblemente periódico: con respecto al espacio* (con un período igual a la longitud de onda λ), y *con respecto al tiempo* (con período T).

Fase de una onda

En la ecuación de la onda

$$x = r \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a}{\lambda}\right)$$

se llama *fase* a la expresión

$$2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a}{\lambda}\right)$$

La fase de una onda es un ángulo: $\frac{t}{T}$ es un número, pues es el cociente de dos tiempos; $\frac{a}{\lambda}$ también, pues es el cociente de dos longitudes; la diferencia entre ambos números también es un número que multiplicado por 2π, que es un ángulo, da como resultado un ángulo.

Para simplificar la notación, podemos llamar φ a ese ángulo que da la fase del movimiento. Entonces la ecuación de la onda será:

$$x = r \operatorname{sen} \varphi$$

Fases de dos movimientos ondulatorios

Vamos a suponer que producimos dos movimientos ondulatorios, uno independiente del otro; por ejemplo, haremos ondular el agua de dos recipientes distintos, y observaremos el movimiento de un punto en cada recipiente.

a) *Movimientos en fase.* Si dos puntos vibran en fase ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$), sus correspondientes ecuaciones, admitiendo que las amplitudes sean iguales ($r_1 = r_2$), son:

$$x_1 = r \operatorname{sen} \varphi \quad \text{y} \quad x_2 = r \operatorname{sen} \varphi$$

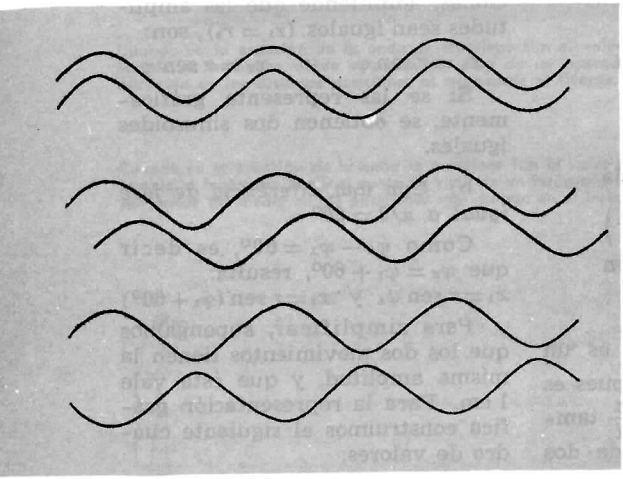
Si se las representa gráficamente, se obtienen dos sinusoides iguales.

b) *Con una diferencia de fase igual a* $\pi/3 = 60°$

Como $\varphi_2 - \varphi_1 = 60°$, es decir que $\varphi_2 = \varphi_1 + 60°$, resulta:
$x_1 = r \operatorname{sen} \varphi_1$ y $x_2 = r \operatorname{sen} (\varphi_1 + 60°)$

Para simplificar, supongamos que los dos movimientos tienen la misma amplitud, y que ésta vale 1 cm. Para la representación gráfica construimos el siguiente cuadro de valores:

φ_1	sen φ_1 sen $(\varphi_1 + 60°)$	$x_1 = 1\text{ cm} \cdot \text{sen}\ \varphi_1$ $x_2 = 1\text{ cm} \cdot \text{sen}\ \varphi_2$
0°	sen 0° = 0 sen (0° + 60°) = 0,866	$x_1 =$ 0 $x_2 =$ 0,866
10°	sen 10° = 0,173 sen (10° + 60°) = 0,939	$x_1 =$ 0,173 $x_2 =$ 0,939
30°	sen 30° = 0,500 sen 90° = 1,000	$x_1 =$ 0,500 $x_2 =$ 1,000
45°	sen 45° = 0,707 sen 105° = 0,965	$x_1 =$ 0,707 $x_2 =$ 0,965
60°	sen 60° = 0,866 sen 120° = 0,866	$x_1 =$ 0,866 $x_2 =$ 0,866
90°	sen 90° = 1,000 sen 150° = 0,500	$x_1 =$ 1,000 $x_2 =$ 0,500
120°	sen 120° = 0,866 sen 180° = 0	$x_1 =$ 0,866 $x_2 =$ 0
150°	sen 150° = 0,500 sen 210° = − 0,500	$x_1 =$ 0,500 $x_2 =$ − 0,500
180°	sen 180° = 0 sen 240° = − 0,866	$x_1 =$ 0 $x_2 =$ − 0,866



Las representaciones gráficas de las elongaciones en función del tiempo, de dos puntos que vibran en fase, son dos sinusoides iguales y que se corresponden.

Las representaciones gráficas de las elongaciones en función del tiempo, de dos puntos que vibran desfasados, son dos sinusoides iguales, pero corridas una con respecto a la otra a lo largo del eje de los tiempos, en un segmento que representa el desfasaje.

Las representaciones gráficas de las elongaciones en función del tiempo, de dos puntos que vibran en oposición de fase, son dos sinusoides iguales pero opuestas: están desfasadas 180°.

Las representaciones gráficas de los dos movimientos son dos sinusoides iguales, pero una desplazada con respecto a la otra. Mientras que una corta al eje de abscisas (donde están los argumentos) en el punto 120°, la otra lo corta en el punto 180°. La diferencia es, precisamente, la diferencia de fase, o *desfasaje*: 60°.

De modo que si se tiene una de las sinusoides y se conoce el desfasaje, se puede representar la otra con sólo desplazar la primera a lo largo del eje de abscisas, en una longitud igual al desfasaje; y, recíprocamente, si ya se tienen las sinusoides, se puede calcular el desfasaje.

c) *Con una diferencia de fase igual a* $\pi = 180°$. Las ecuaciones correspondientes son:

$$x_1 = r \operatorname{sen} \varphi_1$$

y $\quad x_2 = r \operatorname{sen} (\varphi_1 + 180°)$

Pero como

$$\operatorname{sen} (\varphi_1 + 180°) = - \operatorname{sen} \varphi_1$$

en cada instante las elongaciones de los dos puntos considerados tienen el mismo valor absoluto pero signos opuestos; es decir: si uno de los puntos está 0,2 cm por encima de su posición de equilibrio, el otro, en el mismo instante, está también a 0,2 cm de su posición de equilibrio, pero por debajo de ella.

En este caso se dice que *ambos puntos están en oposición de fase*. Es evidente que para que dos movimientos *estén en oposición de fase*, las fases de sus ecuaciones deben diferir en π, $3\,\pi$, $5\,\pi$, $7\,\pi$, es decir, en un número *impar* de π. En símbolos:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = (2\,k + 1)\,\pi^*$$

d) *Con una diferencia de fase igual a* $2\,\pi = 360°$. Las ecuaciones correspondientes son:

$$x_1 = r \operatorname{sen} \varphi_1$$

y $\quad x_2 = r \operatorname{sen} (\varphi_1 + 360°)$

Pero como

$$\operatorname{sen} (\varphi_1 + 360°) = \operatorname{sen} \varphi_1$$

estamos nuevamente en el caso *a)*, es decir, en el caso de dos movimientos en fase.

Lo mismo ocurre si la diferencia de fase es un múltiplo de $2\,\pi$, o sea, un múltiplo par de π. De modo, pues, que la condición para que dos movimientos estén en fase es que la diferencia de sus argumentos sea un múltiplo *par* de π. En símbolos:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2\,k\,\pi$$

¿Cómo actúan dos ondas superpuestas?

En lugar de considerar dos medios diferentes, y un punto en cada uno de ellos, como hicimos hasta ahora, consideremos un solo punto P, colocado en un medio perturbado por dos movimientos ondulatorios simultáneos. Al punto P llegan, pues, dos ondas. ¿Cómo actúan una y otra, y qué movimiento resultante adquiere el punto P? Para simplificar, supon-

* Para representar un número impar, se toma un número cualquiera, k, y se lo multiplica por 2, con lo cual se obtiene un número par; sumando 1 a ese número par se obtiene uno impar, $2\,k + 1$.

gamos que las dos ondas tienen la misma amplitud, el mismo período y la misma longitud de onda. Sean:

$$x_1 = r \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a_1}{\lambda}\right)$$

la ecuación de la primera, y

$$x_2 = r \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a_2}{\lambda}\right)$$

la ecuación de la segunda.

Para saber lo que ocurre a P, se representan las dos ecuaciones, y se suman las ordenadas correspondientes a cada instante, obteniéndose así una nueva sinusoide, que es la representación gráfica del movimiento resultante de P.

Si las dos ondas llegan en fase, el movimiento resultante tiene la misma longitud de onda, el mismo período, pero amplitud doble de las ondas que llegan a P: *las ondas se han reforzado.*

Si las dos ondas llegan en oposición de fase, la representación gráfica que se obtiene es una línea recta; es decir: el tiempo transcurre, pero el punto P no se mueve a pesar de que están llegando a él dos ondas: *éstas se han interferido y anulado.*

Diferencia de fase y diferencia de camino

La fase de la primera onda es

$$2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a_1}{\lambda}\right);$$

y la de la segunda,

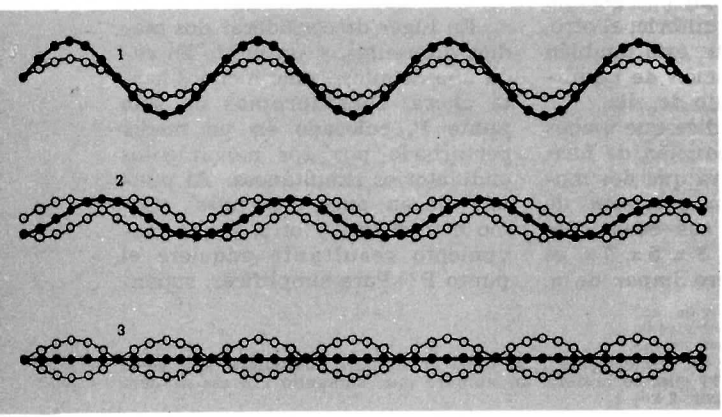
$$2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a_2}{\lambda}\right)$$

La diferencia de fase es, pues, llamándola $\Delta\varphi$,

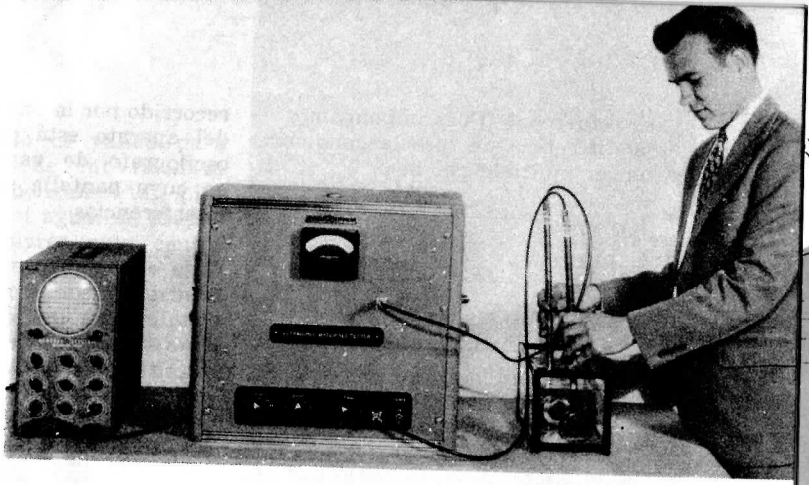
$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a_1}{\lambda}\right) - 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{a_2}{\lambda}\right) =$$

$$= 2\pi\frac{t}{T} - 2\pi\frac{a_1}{\lambda} - 2\pi\frac{t}{T} + 2\pi\frac{a_2}{\lambda}$$

$$\Delta\varphi = 2\pi\,\frac{a_2 - a_1}{\lambda}$$



Cómo se mueve un punto alcanzado por dos ondas: 1) en fase; 2) desfasadas 60°: la resultante tiene la misma amplitud y está 30° adelantada a una y 30° atrasada de la otra; 3) cómo "se mueve" (¡cómo no se mueve!) un punto alcanzado por dos ondas iguales pero en oposición de fase. Las ondas se anulan entre sí: se produce interferencia destructiva.



Probador ultrasónico de materiales (centro) con su transmisor y su receptor (der.) y un osciloscopio (izq.), en cuya pantalla circular se "ven" las ondas sonoras reflejadas.

Es decir que la diferencia de fase de las ondas que llegan a P se puede expresar mediante las distancias de P a las fuentes de perturbación, a_1 y a_2. Y esta expresión es muy cómoda, pues si se quiere encontrar un punto a donde las ondas lleguen con determinada diferencia de fase, el problema se reduce a encontrar la diferencia de camino necesaria para producir la diferencia de fase deseada.

Interferencia y diferencia de caminos

a) *Interferencia destructiva.* ¿Cómo encontrar un punto donde las ondas lleguen en oposición de fase y, por tanto, se destruyan? Pues impongamos a la diferencia de fase la condición de ser múltiplo impar de π:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varphi &= 2\pi\frac{a_2 - a_1}{\lambda}\\ \Delta\varphi &= (2k+1)\pi\end{aligned}\right\} \therefore$$

$$\therefore\ 2\pi\frac{a_2 - a_1}{\lambda} = (2k+1)\pi$$

Luego:

$$\boxed{a_2 - a_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$

Es decir que *hay interferencia destructiva en todo punto cuyas distancias a las fuentes difieren entre sí en un número impar de semilongitudes de ondas.*

b) *Refuerzo de ondas.* ¿Cómo encontrar un punto donde las ondas lleguen en fase y, por tanto,

Interferencia de ondas en el agua. Las zonas grises que se extienden radialmente son zonas nodales: en ellas las ondas provenientes de cada centro emisor se interfieren destructivamente y la superficie del agua no presenta ondas.

se refuercen? Pues impongamos a la diferencia de fase la condición de ser múltiplo par de π:

$$2\,\pi\,\frac{a_2 - a_1}{\lambda} = 2\,k\,\pi$$

Luego:

$$a_2 - a_1 = 2\,k\,\frac{\lambda}{2} = k\,\lambda$$

Esto significa que *hay refuerzo de las ondas en todo punto cuyas distancias a las fuentes difieren entre sí en un número par de semilongitudes de onda* (o, lo que es lo mismo, en un *número entero de longitudes de onda*).

EJEMPLO: *¿Qué diferencia de camino debe haber entre dos ondas de sonido mi₃ cuya frecuencia es* $311\,\frac{1}{s}$, *para que interfieran?* (Velocidad del sonido en el aire, $v = 330$ m/s).

Primero calculamos la longitud de onda de ese sonido:

$$\lambda = v\,T = \frac{v}{f} = \frac{330\text{ m/s}}{311\text{ 1/s}} = 1{,}06\text{ m}$$

La condición para que haya interferencia es

$$a_2 - a_1 = (2\,k + 1)\,\frac{\lambda}{2}$$

Para $k = 0$ se obtiene la menor diferencia de caminos que produce interferencia:

$$a_2 - a_1 = (2 \cdot 0 + 1)\frac{1{,}06\text{ m}}{2} = 0{,}53\text{ m}$$

Con el aparato de Quinke es muy fácil producir interferencia con ondas sonoras. Frente a una de las bocas se emite un sonido. Las ondas sonoras producidas se bifurcan, yendo por las ramas de arriba y de abajo. Esta última se puede alargar o acortar a voluntad, con lo cual se varía el camino recorrido por la onda. El auricular del aparato está conectado a un oscilógrafo de rayos catódicos, en cuya pantalla se observan las interferencias.

El principio de Huygens

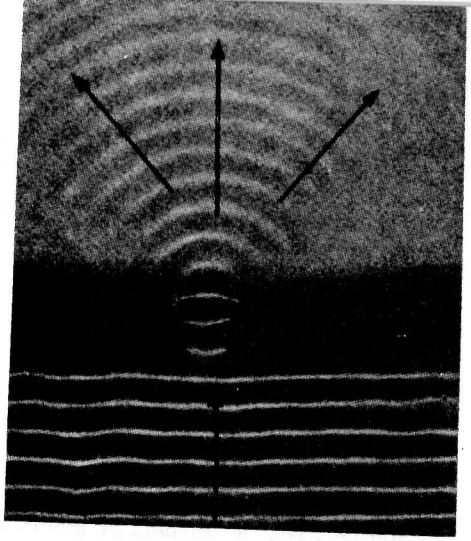
Un agente X, dotado de un movimiento oscilatorio armónico, una campana que vibra, por ejemplo, perturba al medio. A partir de ese agente, que actúa como centro, se propagan ondas. Cada partícula del medio alcanzada por una onda adquiere, a su vez un movimiento oscilatorio armónico, y transmite su movimiento a la partícula siguiente, éste a otra, y así se va propagando la onda.

Pero el hecho que cada partícula transmita su movimiento, significa que cada una puede ser considerada como agente de perturbación, o sea, como centro de ondas. Esto es lo que enunció Cristián Huygens en su famoso principio:

Cada punto alcanzado por un movimiento ondulatorio se convierte, a su vez, en un centro productor de ondas.

Este principio es válido para cualquier clase de movimiento ondulatorio. Supongamos una piedra que cae en el agua: se propagan ondas circulares, cuyo centro común es el punto P, donde cayó la piedra. Apliquemos el principio de Huygens: en determinado instante tenemos el trozo de onda A B, de radio r. Cada uno de los puntos alcanzados por ella se convierte en un centro de ondas, de modo que en un lapso Δt más tarde, las onditas producidas por cada punto tendrán un radio Δr.

Pero obsérvese que si con centro en P se traza un arco de radio $r + \Delta r$, resulta tangente a todos los circulitos de radio Δr. Y ese arco es el lugar que ocupa la onda A B después de transcurrido el lapso Δt. Por eso se dice que la onda total se obtiene como envolvente de las pequeñas ondas elementales. La superficie envolvente es también el frente de onda.

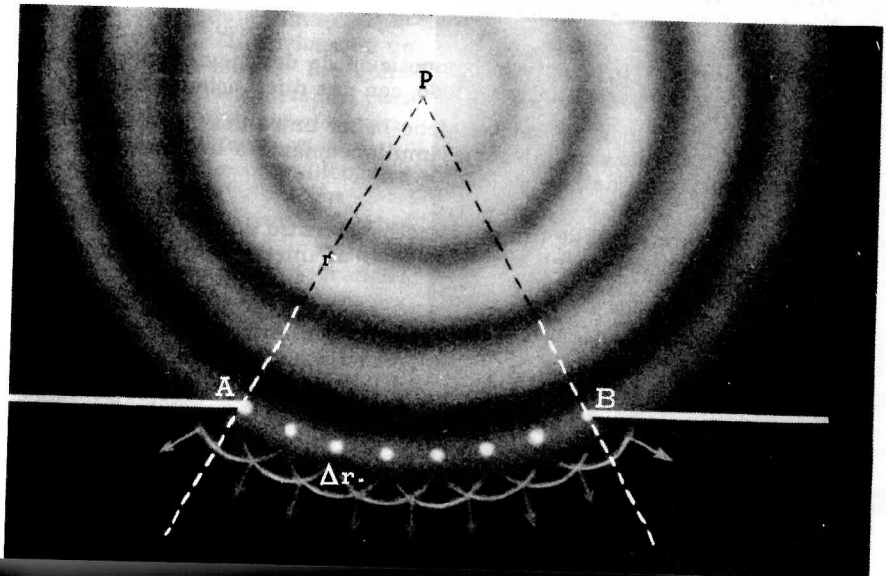


Difracción de ondas en el agua. Llegan ondas a un tabique que tiene un agujerito, y es visible cómo los puntos del agua situados en el agujero se transforman en centros de propagación.

Toda onda rodea los obstáculos

De acuerdo con el principio de Huygens, cuando una onda llega a un obstáculo interpuesto en su camino, lo rodea parcialmente. Y así

El principio de Huygens: cada punto alcanzado por la onda es un nuevo centro de propagación. En los bordes de la abertura por donde pasa la onda se produce difracción.



sucede, en efecto: una empalizada, por ejemplo, no impide que oigamos un ruido producido detrás de ella. La construcción de Huygens nos muestra que, al pasar el obstáculo, hay un frente de onda que se propaga en la región donde el obstáculo "hace sombra". Este fenómeno se llama *difracción de las ondas.*

Problemas

1. Un punto se mueve con movimiento oscilatorio armónico de amplitud 2 cm y período 4 seg. Calcular la elongación y velocidad al cabo de 3 seg de iniciado el movimiento.

R.: -2 cm; 0

2. En un punto P de un medio elástico se produce un movimiento oscilatorio de amplitud 3 cm y período 0,2", que se propaga con una velocidad de 30 cm/s. Calcular: *a)* Longitud de onda del movimiento; *b)* Cuánto tiempo después de haber comenzado a vibrar P comienza a vibrar otro punto Q, distante 2 cm de P.

R.: *a)* 4 cm; *b)* 0,1"

3. La frecuencia de la nota do_3 vale 256 1/s. Calcular: *a)* su longitud de onda cuando se propaga en el aire; *b)* cuando se propaga en el mar, donde la velocidad de propagación del sonido vale aproximadamente 1 420 m/s.

R.: *a)* 1,32 m; *b)* 5,70 m

4. La frecuencia del color amarillo es, aproximadamente, de $5{,}2 \cdot 10^{14}$ 1/s. Calcular: *a)* su longitud de onda cuando se propaga en el aire; b) cuando se propaga en un vidrio donde la velocidad de la luz vale aproximadamente $2 \cdot 10^{10}$ cm/s.

R.: *a)* 5 800 Å; *b)* 3 840 Å

5. Estudiar gráficamente la composición de dos movimientos oscilatorios de la misma amplitud y período, con una diferencia de fase de $\pi/6$.

6. ¿Qué diferencia de camino debe haber entre dos notas mi_3 (frecuencia 311 1/s) para que lleguen simultáneamente a un mismo tiempo con una diferencia de fase de $\pi/4$?

R.: 0,13 m

7. ¿Qué diferencia de camino debe haber entre dos notas do_3 cuando ambas se propagan en el aire, para que al interferir no se produzca sonido?

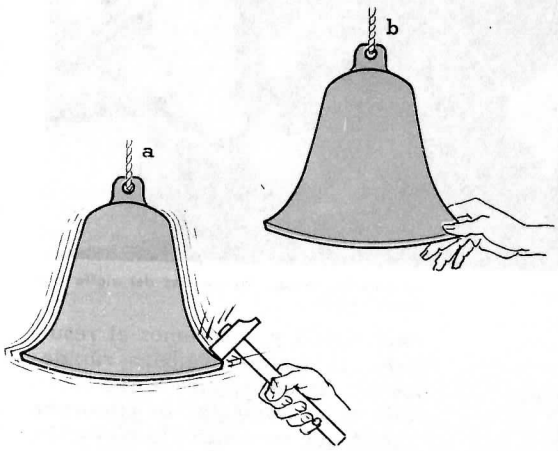
R.: 0,66 m

8. ¿Qué diferencia de camino debe haber entre dos colores rojos (frecuencia aproximada $4{,}6 \cdot 10^{14}$ 1/s), cuando ambas se propagan en el aire para que al interferir se produzca oscuridad?

R.: 3 250 Å

8 EL SONIDO

¿Qué es el sonido?



El sonido es producido por un movimiento vibratorio.

Todos tenemos una idea de lo que se llama *sonido*, puesto que a menudo hablamos del "sonido de un piano", del "sonido de una campana", etc. El sonido es un fenómeno físico percibido por el oído. Pero, ¿cómo se produce? ¿Qué lo produce? ¿Cómo se propaga?

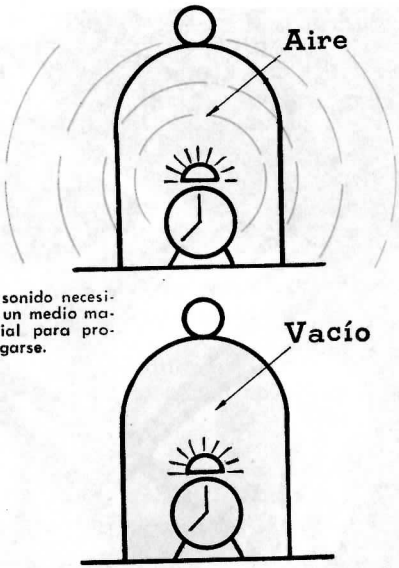
Por lo pronto, si escuchamos un sonido pensamos que debe haber algo que lo produce. Ese algo es relativamente fácil de encontrar. Si oímos el sonido de una campana, sabemos que él proviene de un golpe dado a la misma. Ese golpe hace *vibrar* la masa metálica, cosa que podemos comprobar si acercamos un dedo y la tocamos con suavidad: sentimos un cosquilleo, que indica una rápida vibración.

¿Qué pasa si apoyando fuertemente nuestra mano impedimos que la campana siga vibrando? Todos hemos hecho alguna vez esa

Con instrumentos musicales construidos con tambores vacíos de petróleo, estos hawaianos consiguen tonos tan suaves como los del xilofón o la guitarra hawaiana.

Al hacerlas vibrar, las cuerdas del violín producen sonido.

experiencia y conocemos el resultado: el sonido se apaga rápidamente. Es decir, *parece que el sonido es causado por la vibración*, puesto que *terminada la vibración, el sonido se apaga.*



El sonido necesita un medio material para propagarse.

Pensemos en otros casos, para ver si podemos confirmar esta sospecha. ¿Cuándo se produce un sonido en un piano? Cuando apretando una tecla hacemos que el pequeño martillo golpee la cuerda y la haga vibrar. Del mismo modo, para hacer sonar una cuerda de guitarra o de violín hay que hacerla vibrar. En todos los casos llegaríamos a la misma conclusión:

El sonido es producido por un movimiento vibratorio.

Para transmitirse, el sonido necesita siempre un medio elástico sólido, líquido o gaseoso:

En el vacío, las ondas sonoras no se propagan.

Si hacemos funcionar un timbre eléctrico o un despertador dentro de una campana de vidrio, se produce un sonido que se propaga por el aire encerrado en la campana, hasta alcanzar el vidrio; luego se transmite a través de éste y llega al aire exterior, y a nuestros oídos.

Si hacemos el vacío dentro de la campana, no hay aire que propague el sonido desde el timbre hasta el vidrio, y a pesar de que vemos al martillo golpeando en la campanilla, no oímos nada.

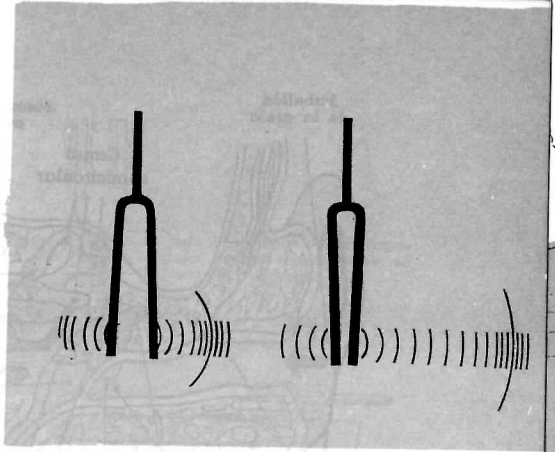
Los líquidos transmiten el sonido

Un nadador puede oír debajo del agua el golpe de dos piedras, o el ruido del motor de un barco, o bien la conversación de dos personas.

Los sólidos transmiten el sonido

Aplicando el oído sobre las vías del ferrocarril, puede escucharse la marcha de un tren distante. El oído aplicado al suelo percibe el galope del caballo que aún no se alcanza a divisar.

Los chicos suelen jugar con un "teléfono" construido con un piolín tenso entre dos cajitas de lata: el piolín transmite el sonido, con lo cual puede sostenerse una conversación entre dos puntos alejados.



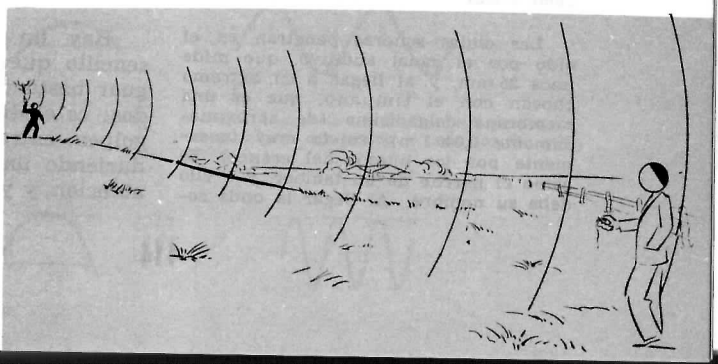
El sonido se propaga a través del agua.

Joven escuchando sonido con el oído pegado a la mesa.

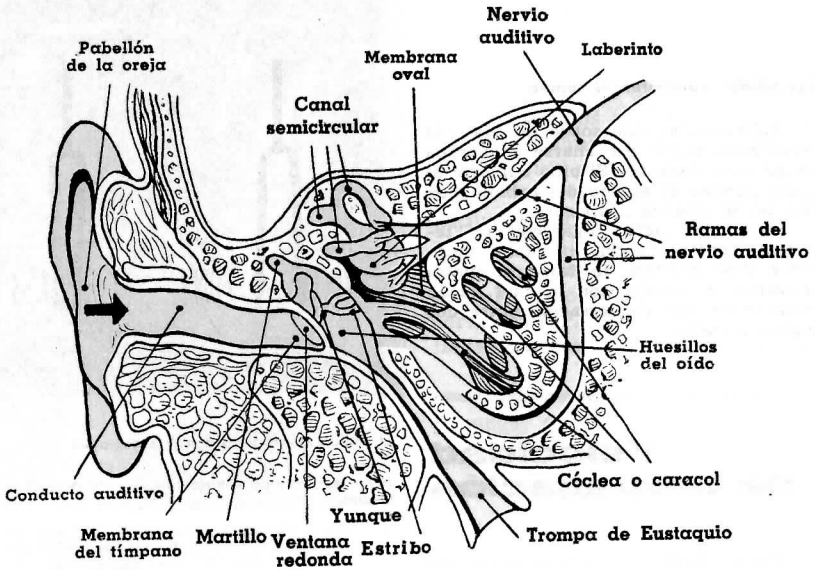
Velocidad de propagación

Para medir la velocidad de propagación del sonido, se sitúan dos observadores, separados por una distancia conocida. El observador A hace un disparo. El observador B, al ver el fogonazo, pone en marcha un cronómetro, y en el instante de oír el ruido del disparo detiene la marcha del mismo. El cronómetro señala el tiempo transcurrido entre la producción del sonido en A y su llegada a B.

Recordando que una velocidad se obtiene dividiendo una distancia por el tiempo empleado en recorrerla, $v = \frac{d}{t}$, basta reemplazar los datos y se obtiene la velocidad del sonido, que en el aire es de aproximadamente 340 m/s.



Cómo medir la velocidad del sonido.



Esquema del aparato auditivo humano.

Velocidad en el agua y en los sólidos

La velocidad del sonido en el agua dulce es de 1 435 m/s; en el agua de mar, 1 500 m/s.

En el latón es unas 10 veces la velocidad en el aire, y en el hierro, unas 15 veces.

EJEMPLO: *A los 6 segundos de ver un relámpago se oye el trueno. Calcular a qué distancia se produjo.*

$d = v\,t = 340 \text{ m/s} \cdot 6^s \cong 2\,000 \text{ m}$

Cómo oímos

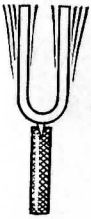
Las ondas sonoras penetran en el oído por el canal auditivo, que mide unos 25 mm, y al llegar a su extremo chocan con el tímpano, que es una membrana delgadísima (de aproximadamente 0,000 1 m), sujeta muy tensamente por los huesos del cráneo. Es como el parche de un tambor, y a ello debe su nombre. Al llegar la onda sonora, el tímpano vibra, y esta vibración se propaga hacia adentro, mediante los huesecillos del oído, el primero de los cuales está apoyado en el tímpano y el último en la ventana oval, por donde la vibración pasa al laberinto.

No se sabe con certeza cómo es que oímos, pero en el laberinto hay una multitud de nerviecitos, que parecerían funcionar como las cuerdas de un piano: cada uno de ellos es sensible a un cierto sonido, y cuando es excitado, envía la sensación al cerebro, el que elaborando todas las sensaciones recibidas, nos las hace percibir como sonidos.

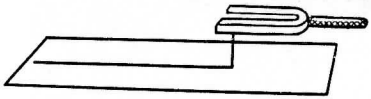
Característica de un sonido

Hay un aparato sumamente sencillo que nos permitirá averiguar bastante acerca de los sonidos: es el *diapasón*. Cuando se lo golpea entra en vibración, produciendo un sonido que llama la atención, y ya veremos por qué.

Si en el extremo de una de sus ramas colocamos una pequeña aguja, podremos inscribir el movimiento de la rama sobre una hoja de papel, como lo indica la figura. Se obtendrá una curva llamada *sinusoide*. Si se conoce la velocidad de traslación del papel, se puede calcular el tiempo que emplea la rama del diapasón en realizar una oscilación completa, es decir, el período T.



Las vibraciones de un diapasón pueden inscribirse en una faja de papel.

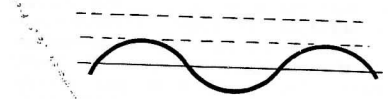


Intensidad y altura

Si ahora golpeamos el mismo diapasón con mayor fuerza, el sonido producido sólo se diferenciará del anterior en que es más intenso. ¿Cómo se refleja en la sinusoide esa mayor intensidad? Simplemente, la amplitud de la sinusoide es ahora mayor, pues es mayor la amplitud del movimiento vibratorio:

A mayor amplitud, sonido más intenso.

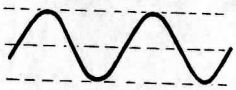
Tomemos ahora dos diapasones que produzcan sonidos diferentes, y observemos las sinusoides que inscriben, para ver la diferencia. Para simplificar, hagamos que los dos sonidos tengan la misma intensidad.



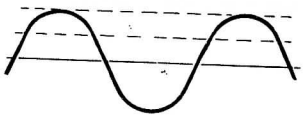
A mayor amplitud de la vibración, mayor intensidad del sonido.

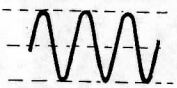
Observaremos que las dos sinusoides tienen la misma amplitud, pero el sonido más alto ha inscripto una sinusoide más apretada, es decir, que el sonido de mayor altura tiene un período menor. Como en acústica se habla de la frecuencia más que del período, diremos (recordando que la frecuencia es la inversa del período):

A mayor frecuencia, sonido más alto (o más agudo).



A mayor frecuencia (menor longitud de onda), mayor altura del sonido o sea sonido más agudo.



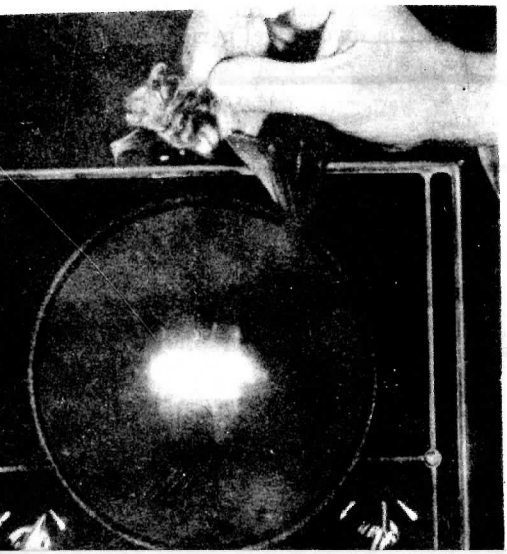


Un "hombre rana" puede oír debajo del agua el ruido del motor de un barco.

El diapasón emite un sonido puro

En la hoja de papel en donde el diapasón inscribe su movimiento, se observa una sinusoide perfecta. Ello revela que el sonido que produce el diapasón es un sonido puro, es decir, que no está mezclado con otros. En general, no estamos acostumbrados a escuchar sonidos puros, y por eso nos sorprende el sonido de un diapasón. Los instrumentos musicales no emiten sonidos puros, sino que cada nota es un conjunto de sonidos producidos simultáneamente.

Fotografía de la voz de un murciélago. Una persona no oye sus chillidos, pero el oscilógrafo los revela.



El timbre

Una misma nota musical, producida por un piano y por un violín no suena igual. La diferencia se debe a que el sonido fundamental, si bien se halla presente en los dos casos, está acompañado de otros, distintos en cada caso, ya sea en intensidad, ya sea en frecuencia. El conjunto de sonidos que acompañan al fundamental es lo que da el *timbre*.

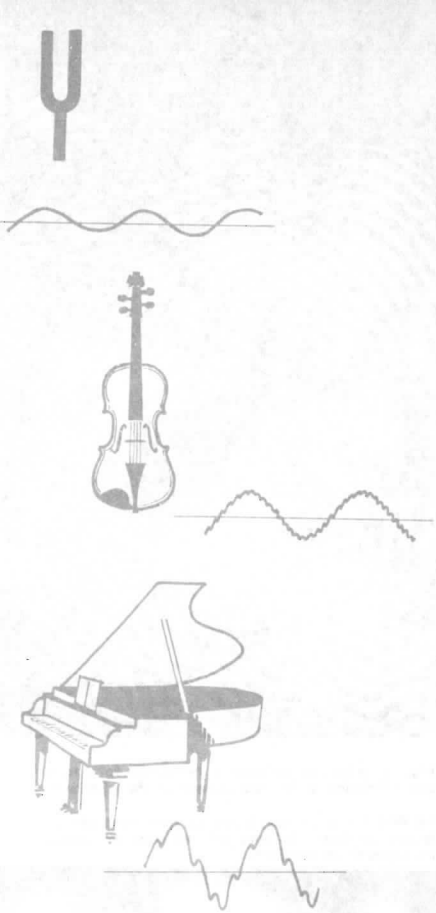
Por el timbre reconocemos la voz de una persona, de un cantante, por ejemplo, aun cuando otros produzcan las mismas notas con la misma intensidad y con la misma frecuencia.

Gama de los sonidos perceptibles por el oído humano

El oído humano sólo puede percibir los sonidos comprendidos entre ciertos límites de frecuencia. Fuera de ellos, el oído permanece *sordo*. El límite inferior está entre las 16 y 20 vibraciones por segundo. Es decir, el sonido más grave que se puede oír está comprendido entre dichas frecuencias. El límite superior, muy variable de una persona a otra, se puede colocar en 20 000 oscilaciones por segundo. Más allá de dicha frecuencia no se percibe ya sonido alguno. Sin embargo, sonidos de frecuencia superior a aquella que el oído humano es capaz de percibir, son captados por animales como el perro.

Es muy curioso lo que pasa con los murciélagos. Mucho antes que el hombre inventase el vuelo a ciegas, los murciélagos lo realizaban con extrema eficiencia. Se ha comprobado que, en efecto, estos mamíferos voladores son capaces de volar en cuartos absolutamente privados de luz. Al comienzo se creyó que podían tener ojos superdotados para las mayores oscuridades, pero una experiencia demostró que esta hipótesis no era correcta: se taparon con tela adhesiva los ojos de algunos murciélagos y se los soltó en habitaciones llenas de obstáculos. Los animalitos volaron sin dificultad.

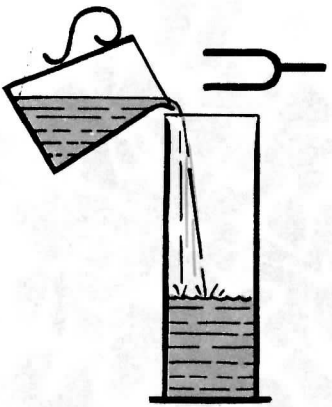
Entonces se pensó que quizá tuviesen un oído extremadamente fino. Y, en efecto, así era, pues cuando se los soltó con los oídos tapados, perdieron su facultad de volar sin tropezar en la oscuridad. Los físicos averiguaron enseguida cuál era el mecanismo de estos pilotos nocturnos. Micrófonos especiales revelaron que, durante el vuelo, emitían gritos agudísimos, inaudibles para el hombre, pues llegaban a las 50 000 vibraciones por segundo. Estos ultrasonidos emitidos por los murciélagos, se propagan a unos 340 m/s en torno del animal; al llegar a un obstáculo cualquiera, las ondas son reflejadas y vuelven hacia el murciélago, que se informa así de los obstáculos que tiene delante. Como se ve, un verdadero *radar* sonoro.



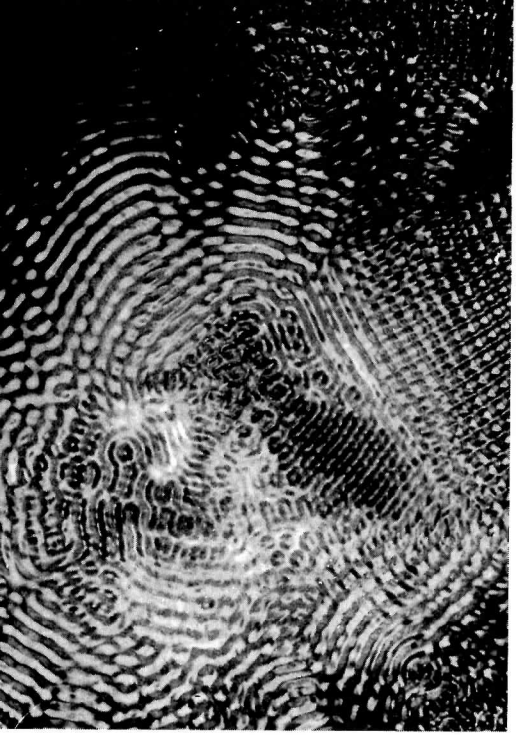
El timbre de un sonido está dado por el conjunto de sonidos que acompañan al sonido fundamental.

Resonancia

Si hacemos vibrar un diapasón y lo colocamos frente a la boca de un tubo con agua, cuando la columna alcanza cierta altura el sonido se hace más intenso. Esto se debe a que la columna de aire del tubo se pone a vibrar, y sus oscilaciones, de frecuencia igual a la del diapasón, refuerzan las de éste, aumentando su intensidad. La columna de aire del tubo vibra por resonancia.

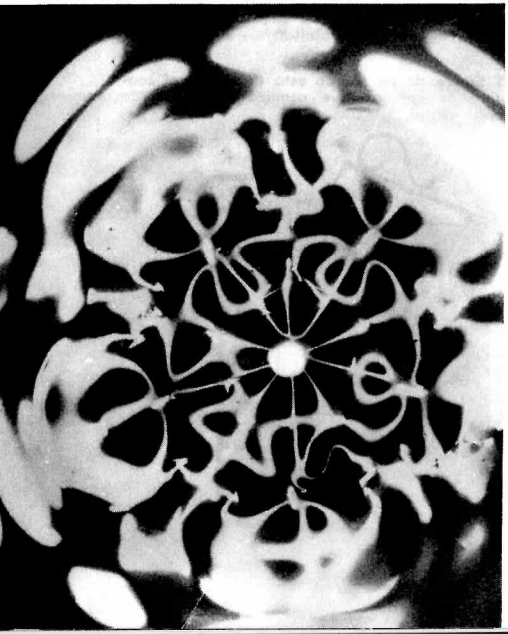


El sonido del diapasón se ve reforzado al alcanzar el agua un determinado nivel.



Figuras a la vez curiosas y hermosas formadas por vibraciones de una superficie de glicerina.

La frecuencia es mayor en la que tiene menor trama (arriba). Es muy útil estudiar las ondas en superficies líquidas.



Los diapasones llevan cajas de dimensiones adecuadas, de modo que cuando los hacemos vibrar, la columna de aire de la caja vibra por resonancia, y el sonido producido es así mucho más intenso.

Con el piano es sencillo realizar una experiencia de resonancia: se pisa una tecla, por ejemplo la correspondiente a la nota do, tan lentamente que el martillo no alcance a golpear la cuerda, y se la mantiene apretada; luego se van tocando otras notas, cada una con un golpe seco. Se observará que cuando se tocan ciertas notas, aquella cuya tecla tenemos apretada comienza a sonar, sin que la hayamos tocado. El sonido es máximo cuando tocamos los otros does.

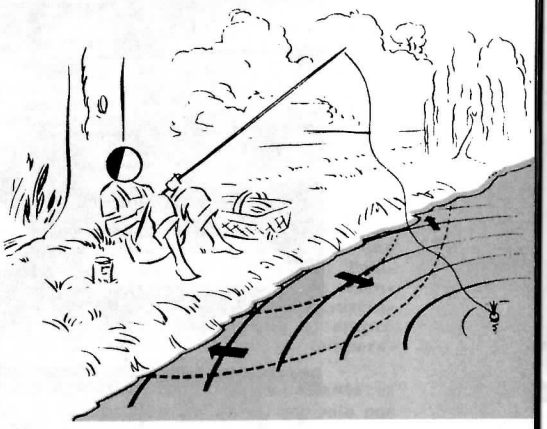
El fenómeno de resonancia no sólo se produce con ondas sonoras, sino con toda clase de vibraciones. Cuando una tropa de soldados marcha sobre un puente, se les hace "romper el paso" para evitar que la frecuencia del movimiento rítmico de la tropa pueda coincidir con la frecuencia de la vibración propia del puente. Cuando ello ha ocurrido, los efectos siempre han sido terribles: al entrar en "resonancia" el puente, vibra con frecuencia doble a la propia y se destruye.

En resumen: un cuerpo vibra por resonancia cuando a él llegan vibraciones de frecuencia igual a la propia de vibración del cuerpo.

Reflexión del sonido

Si arrojamos una piedra en un estanque, se producen ondas que se propagan; al llegar a las pare-

des se reflejan y vuelven en sentido contrario. De un modo semejante, las ondas sonoras se reflejan cuando encuentran una superficie dura en su camino. Colocando un reloj en el fondo de un tubo, sobre objetos blandos, no puede escucharse su marcha a cierta distancia del mismo. Si en la boca del tubo colocamos un plano como indica la figura, el sonido se reflejará en él y podrá ser escuchado.

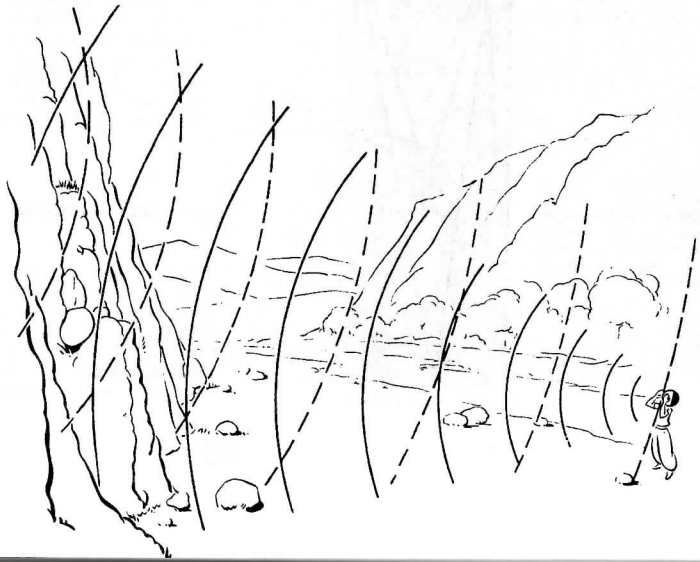


Reflexión de ondas en el agua.

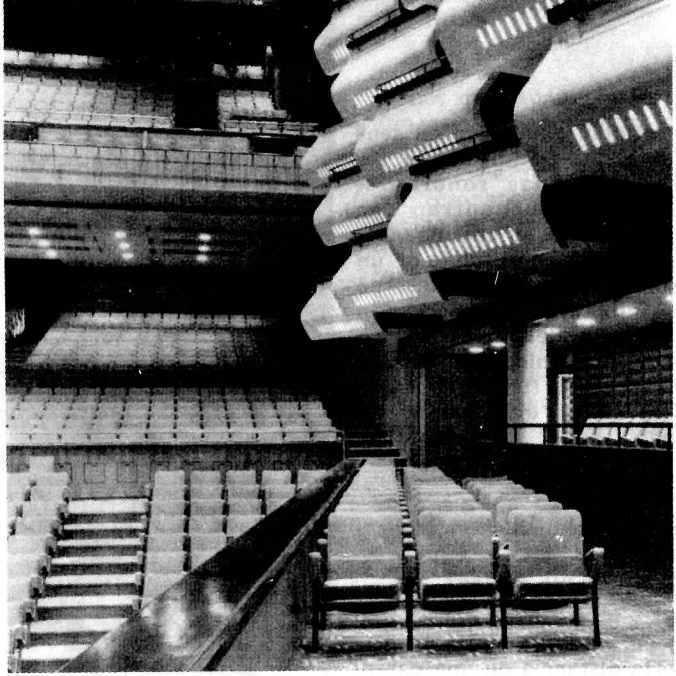
Eco

Una persona que emita un grito a cierta distancia de una pared, vuelve a percibir el mismo instantes después. Esto se debe al *eco*, que es la repetición de un sonido causada por su reflexión. Al emitir un sonido en las montañas, sobre todo en ciertos lugares se escucha el eco no una, sino varias veces, por las sucesivas reflexiones en las laderas.

Reflexión de ondas sonoras.



El eco es debido a la reflexión del sonido.

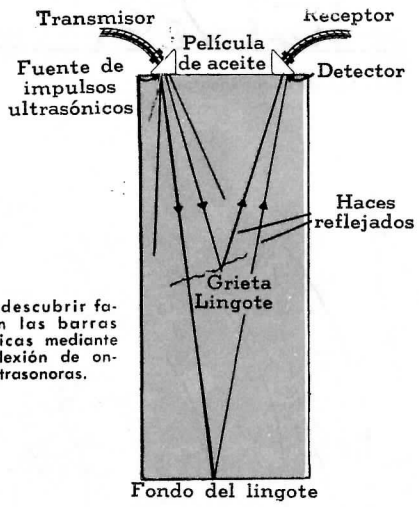


Sala del Royal Festival Hall, Londres.

Absorción del sonido

Si arrojamos una pelota contra el suelo duro, rebota. El suelo devuelve el golpe. En cambio, si arrojamos la pelota sobre una cama ésta absorbe el golpe, y la pelota no rebota, no se refleja.

Lo mismo ocurre con las ondas sonoras. Si encuentran superficies duras, se reflejan en ellas; si encuentran cortinas o materiales a prueba de sonidos, son absorbidas. La propiedad de ciertas sustancias a prueba de sonidos es aprovechada en los teatros y cines modernos para evitar la reverberación o producción de ecos múltiples.



Cómo descubrir fallas en las barras metálicas mediante la reflexión de ondas ultrasonoras.

Las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas tienen muchísimas aplicaciones prácticas. Ya en la guerra del 14 se las empleó para descubrir la presencia de submarinos. Se las aplica también en la determinación del lugar preciso donde está un barco hundido, en la medición de profundida-

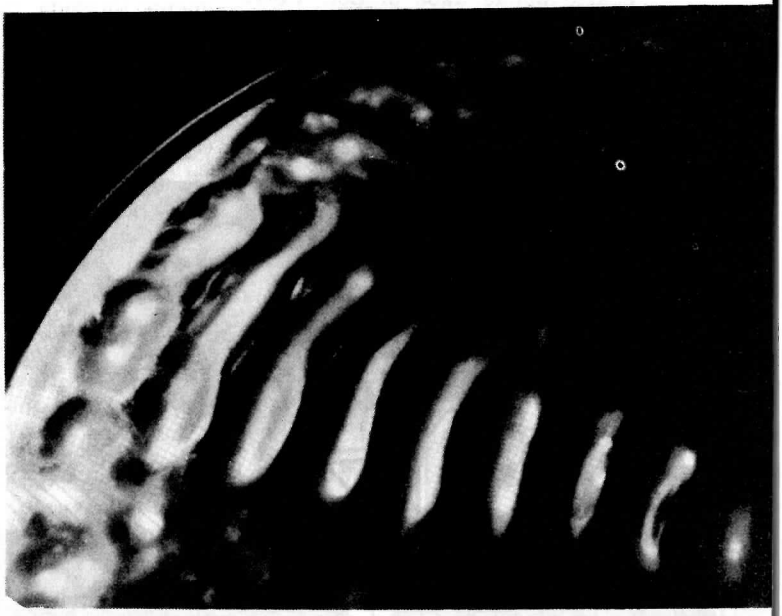
des, en ubicar un cardumen, resultando así un excelente auxiliar para la pesca.

Uno de los medios de producir ondas ultrasónicas es aprovechar el fenómeno piezoeléctrico: cuando los lados opuestos de una lámina de cuarzo están sometidos a un voltaje eléctrico, la lámina se contrae o se dilata levemente. Si se aplica un voltaje alternado, la lámina se dilatará y contraerá tantas veces por segundo como cambie el voltaje, y así entrará en vibración. Se comprende, entonces, que si se aplica un voltaje alternado, de unas 10 000 vibraciones por segundo, se escuchará un zumbido; pero si se aumenta el número de vibraciones, por ejemplo a 60 000 por segundo, se habrá producido un ultrasonido.

Se los utiliza mucho en la industria, para descubrir fallas en los metales. Al efecto, se produce una onda ultrasónica, que se transmite a través del metal, hasta llegar a la cara opuesta, donde se refleja y es captada por el detector. Si en el camino encuentra una falla, la onda se refleja en ella, y el eco llega al detector, donde se aprecia la diferencia, por el eco producido en la cara opuesta.

Otras de las aplicaciones de las ondas ultrasonoras es la de matar microorganismos: al enfocar sobre ellos un haz ultrasónico, los hace entrar en rapidísima vibración, con lo cual mueren. También se las utiliza para fabricar emulsiones. Por ejemplo, un haz ultrasónico elimina la superficie de separación entre el aceite y el agua, a causa de la rápida vibración, formando una emulsión de gotas pequeñísimas. También se ha experimentado con el calentamiento producido por los ultrasonidos: un ratón sobre el que se enfocó un haz, llegó a aumentar su temperatura hasta los 113° C.

Otra aplicación muy importante es en la eliminación del humo que sale por las chimeneas de las fábricas. Cuando el haz ultrasónico incide sobre el humo, las pequeñísimas partículas en vibración se agrupan entre sí, formando partículas más grandes, que caen rápidamente.



Superficie de fuel oil sometida a vibraciones supersónicas en los laboratorios de Esso.

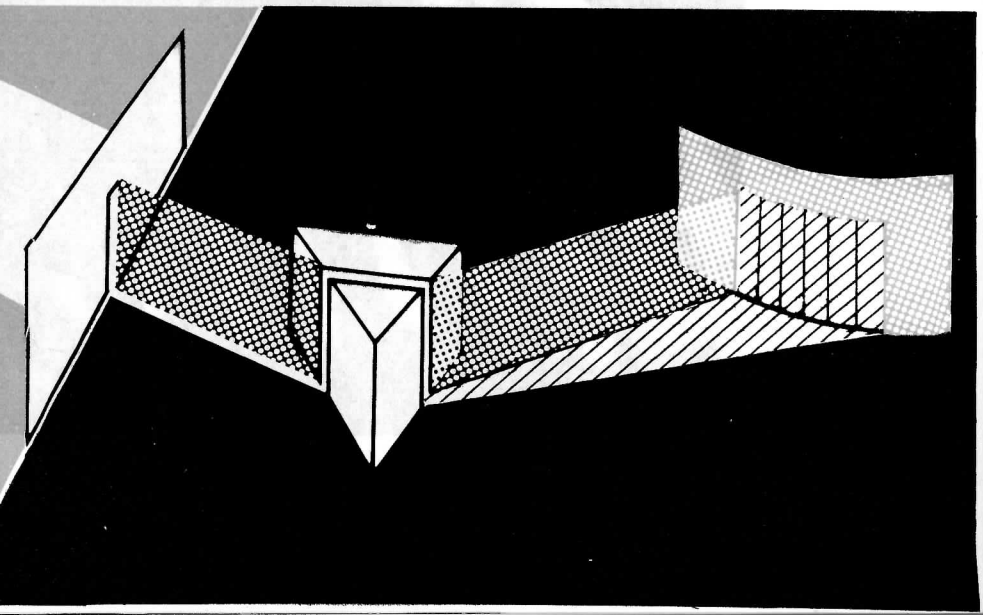
9 LUZ Y COLOR

La dispersión de la luz

Newton cuenta así, en su *Óptica*, cómo observó los colores de la luz solar: "Hice un agujero redondo, de aproximadamente 1 cm de diámetro, en la ventana de un cuarto donde daba el Sol. Cerré todo, de modo que el cuarto estuviera bien oscuro, y pegado al agujero, por donde entraba un haz de rayos de Sol, coloqué un prisma de cristal. La luz se refractaba hacia arriba, hacia la pared opuesta del cuarto, formando allí una imagen en colores del Sol.

"... observé la figura y dimensiones de la imagen solar formada en el papel por esa luz, ... que era oblonga, pues estaba formada por dos lados rectilíneos y paralelos, y dos extremos semicirculares. Sobre los lados estaba bien nítidamente limitada, pero sus extremos eran confusos y poco nítidos, decayendo y desvaneciéndose la luz gradualmente".

Descomposición de la luz a través de un prisma.

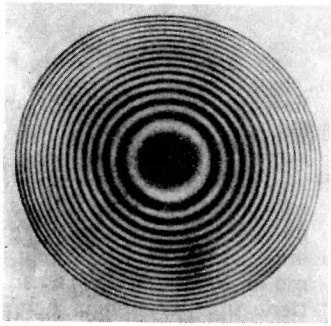


"... Esta imagen o espectro era de diferentes colores: roja en su extremo menos refractado, y violeta en el más refractado; amarillo, verde y azul en los espacios intermedios."

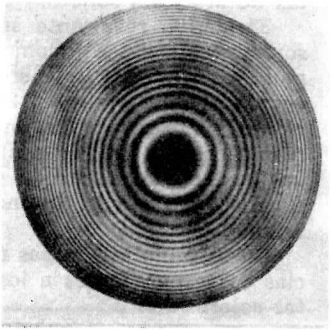
Newton demostró así que la luz blanca no es simple, sino que está compuesta por luces de varios colores.

La descomposición de la luz en sus colores componentes se llama DISPERSIÓN DE LA LUZ.

Los hermosos colores del arco iris se deben a la dispersión de la luz del Sol en las gotas de agua mientras está lloviendo.

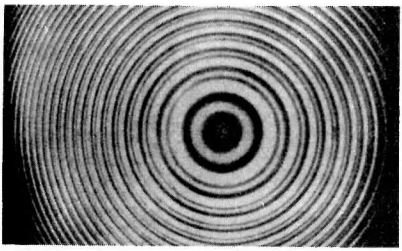


Anillos de Newton producidos por luz de un solo color (arriba) y por dos colores (abajo). El doble juego de anillos obtenido con un interferómetro Falry-Pérot muestra que la luz analizada está constituida por dos colores muy parecidos.

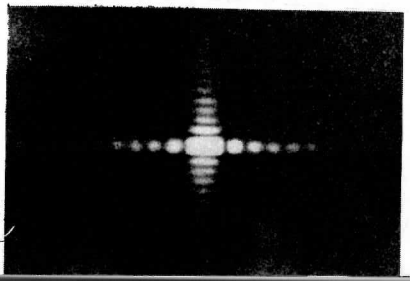


El color y la frecuencia

La dispersión de la luz plantea un problema: ¿Qué es el color? No podemos contestar sin resolver antes otro problema, mucho más amplio y difícil: ¿Qué es la luz? Ya hemos hablado acerca de las dos teorías sobre la naturaleza de la luz: la corpuscular, de Newton y la ondulatoria, de Huygens. En los siguientes capítulos nos referiremos a la larga controversia entre ambas teorías, pero podemos adelantar que en la explicación de la dispersión se prefirió siempre la teoría de Huygens. Según Newton, la dispersión se debe a que la luz blanca está formada por una mezcla de corpúsculos que tienen distinto tamaño para cada color. Cuando un rayo de luz blanca atraviesa un prisma, los corpúsculos más grandes son atraídos con mayor fuerza que los más peque-



Una abertura rectangular pequeña se ve así porque la luz se comporta como onda.



ños, por lo cual se desvían más, y así, cada color se separa de los otros.

Para Huygens, en cambio –y ésta es la explicación más aceptada–, los colores se diferencian entre sí por su *frecuencia*. Así como en la escala sonora cada sonido tiene una frecuencia determinada, en la "escala" de los colores cada color tiene una frecuencia distinta. La luz blanca es sólo la mezcla de los distintos colores del espectro; algo así como si en música oyésemos simultáneamente todas las notas de la escala sonora.

El sonido resultante sería "un sonido blanco". Así como llamamos do a la nota que emite una cuerda cuando produce 128 vibraciones sonoras por segundo, llamamos roja a la luz emitida por un foco donde se producen unas $4{,}6 \cdot 10^{14}$ vibraciones luminosas por segundo.

En término medio, las frecuencias correspondientes a los distintos colores son:

		vibraciones
Rojo	$= 4{,}6 \cdot 10^{14}$	segundo
Anaranjado ..	$= 5{,}0 \cdot$	„
Amarillo	$= 5{,}2 \cdot$	„
Verde	$= 5{,}7 \cdot$	„
Azul	$= 6{,}4 \cdot$	„
Violeta	$= 7{,}3 \cdot$	„

Cuando una luz consiste en vibraciones de una sola frecuencia, se llama *monocromática*.

El color y la longitud de onda

Como las frecuencias luminosas son muy elevadas y resultan números incómodos para manejar, se caracteriza a cada color por su longitud de onda (λ). Esta característica se vincula con la frecuencia, como vimos en el capítulo 7, por medio de la expresión

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

donde f es la frecuencia y v la velocidad de propagación de la luz. Como ésta varía según los medios que atraviesa, un mismo color tiene distintas longitudes de onda, por ejemplo, en el aire y en el agua. Pero cuando se da una longitud de onda sin agregar ninguna otra aclaración, se entiende que se trata de luz en el vacío, o en el aire.

En término medio, las longitudes de onda correspondientes a los distintos colores son:

Rojo	6 500 Å
Anaranjado	6 000 Å
Amarillo	5 800 Å
Verde	5 200 Å
Azul	4 700 Å
Violeta	4 100 Å

La *luz monocromática* está formada por vibraciones de una sola longitud de onda.

NOTA: A es el símbolo del Ångstrom, unidad de longitud, cuya pequeñez la hace muy apta para las medidas de longitudes de onda. Su equivalencia con el centímetro es la siguiente:

$$1 \text{ Å} = 0{,}000\,000\,01 \text{ cm} = 0{,}000\,1 \ \mu$$

El color y el índice de refracción

En la experiencia de Newton, los rayos del Sol que inciden sobre el prisma son paralelos entre sí, pero al salir del prisma divergen, y esa divergencia es lo que produce la descomposición de la luz. El prisma desvía más unos colores que otros. En otras palabras: la sustancia de que está hecho el prisma tiene un índice de refracción distinto para cada color.

El color menos desviado es el rojo, siguiéndole, en orden creciente, el anaranjado, el amarillo, el verde, el azul y el violeta. En ese mismo orden decrecen las longitudes de onda, de modo que:

A mayor longitud de onda corresponde menor desviación.

A mayor longitud de onda, una misma sustancia ofrece menor índice de refracción.

TABLA

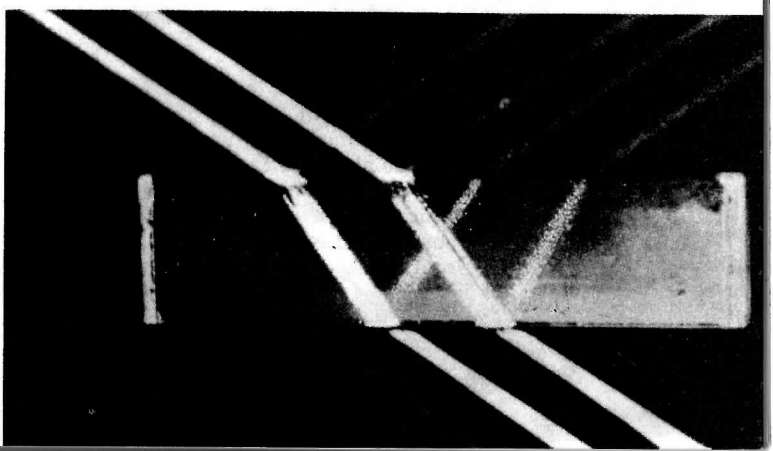
Cómo el índice de refracción depende de la longitud de onda de la luz incidente

Color	λ (en μ)	Vidrio Crown liviano	Vidrio Flint mediano	Vidrio Flint pesado	Bisulfuro de Carbono
Rojo	0,6563	1,5146	1,6224	1,6500	1,6182
Amarillo	0,5893	1,5171	1,6272	1,6555	1,6276
Azul	0,4861	1,5233	1,6385	1,6691	1,6523
Violeta	0,3969	1,5325	1,6625	1,6940	1,6994

Cuando se da el índice de refracción de una sustancia sin decir explícitamente el color empleado en la determinación, se sabe que es el índice determinado con la luz amarilla del sodio.

Los colores de las cosas

Mirando a nuestro alrededor podemos distinguir objetos de distintos colores: unos rojos, otros



A pesar de que a cada color corresponde un índice de refracción, si el haz de luz blanca es paralelo al incidir, también es paralelo al emerger. ¿Cómo se explica esta aparente contradicción?

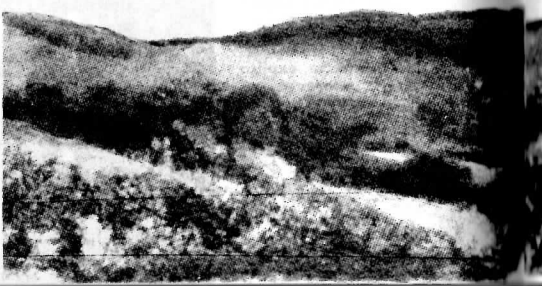
Carteles luminosos.

azules, otros verdes, amarillos, etc. Si todos están iluminados por la misma luz, ¿a qué se debe que cada uno presente un color diferente? La razón es sencilla: cuando una luz blanca incide sobre un objeto, éste absorbe parte de los rayos incidentes, y difunde y refleja los demás; si la mayor parte de los difundidos y reflejados son rojos, veremos rojo al objeto; si son azules, lo veremos azul, etc. Los pigmentos son sustancias que tienen la propiedad de absorber las radiaciones de ciertas longitudes de ondas, y difundir las de otras, justamente las correspondientes al color con que los vemos.

En cuanto al color que presentan los cuerpos por transparencia, como por ejemplo los vidrios, tienen una explicación análoga: un vidrio rojo solamente deja pasar las radiaciones de longitud de onda correspondientes al rojo; absorbe, en cambio, todas las demás; un vidrio azul sólo deja pasar los rayos azules y absorbe todos los demás.

El color de las cosas, por lo tanto, no depende exclusivamente de ellas mismas sino también de la luz que las ilumine. Si tenemos un papel azul (es decir, cuya superficie absorbe todas las radiaciones que inciden sobre ella, menos las azules, a las cuales refleja o difunde) y lo iluminamos con luz roja, lo veremos negro, porque no difunde o refleja luz, pues absorbe toda la que le llega. Si hacemos incidir un haz de luz verde sobre un vidrio rojo, mirándolo a trasluz aparecerá negro, pues no pasa luz a través de él.

Naturalmente que la observación de los colores depende también del comportamiento del ojo respecto de los colores. Así, por ejemplo, en un cartel brillante-

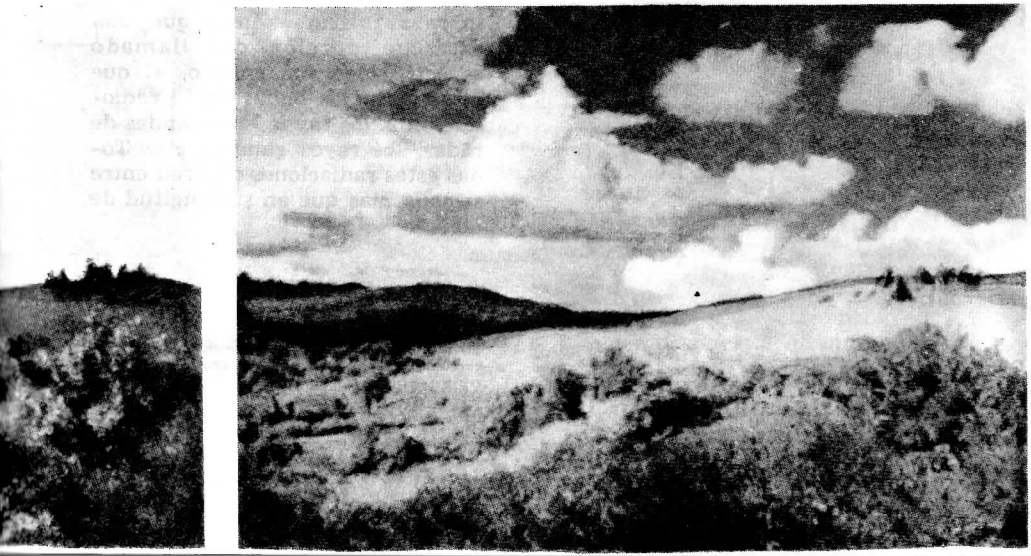


mente coloreado las letras rojas parecen estar delante de las azules. Un ejemplo curioso es el de la bandera francesa: las tres bandas verticales (roja, blanca y azul) no son de igual ancho. Originalmente el ancho era igual, pero se notó que la franja azul parecía más ancha que la franja roja. Para evitar esta diferencia hubo que hacer las tres bandas diferentes, que es la única manera de conseguir que el ojo las vea iguales.

Los colores invisibles

En 1842, Edmundo Becquerel, físico francés, fotografió por primera vez el espectro solar. El resultado de esta experiencia fue sorprendente e importante: la fotografía no era igual al espectro que Edmundo Becquerel había mirado. Coincidían en parte, pero del lado del violeta, en la fotografía aparecían líneas mucho más allá de donde, a simple vista, terminaba el espectro. En el otro extremo sucedía lo contrario: gran parte de la zona del rojo, fácilmente visible cuando se mira el espectro, no aparecía en la fotografía. Lo que no aparecía del rojo era una parte de luz roja que no impresionaba la placa usada por Becquerel; y, análogamente, lo que en la fotografía se veía más allá del violeta, era producido por una luz que no impresiona al ojo humano, pero sí a la placa fotográfica. Así se descubrió la región ultravioleta del espectro, que incluye las longitudes de onda comprendidas entre 4 000 Å y unos 2 000 Å. Más adelante se fabricaron emulsiones fotográficas especialmente sensibles al ultravioleta y se descubrieron radiaciones de longitudes de onda todavía inferiores a los 2 000 Å. Éstas constituyen lo que se conoce con el nombre de ultravioleta lejano, y aquéllas el ultravioleta cercano.

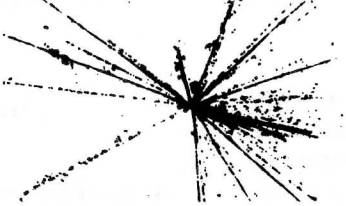
La fotografía de la izquierda se ha tomado con película común, y la de la derecha con película sensible al infrarrojo. Obsérvese la claridad de los detalles de esta última, y el color claro de la vegetación debido a que la clorofila, bastante opaca a la luz común, deja pasar los rayos infrarrojos, que se reflejan en las capas internas. Este mismo hecho permite individualizar partes muertas o enfermas de las plantas.

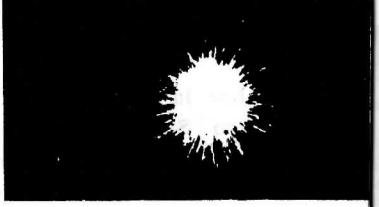


Pero no sólo hay colores invisibles hacia el lado del violeta, sino que el espectro se extiende también del lado del rojo. Para investigar la región infrarroja, Langley construyó el *bolómetro*, que es un termómetro extraordinariamente sensible, ya que permite apreciar diferencias de temperatura de 0,000 000 1° C. En esencia, consiste en una delgadísima cinta de alambre cuya resistencia eléctrica varía cuando cambia su temperatura. Langley expuso su bolómetro en las distintas zonas del espectro y observó que la temperatura crecía a medida que se acercaba al rojo. Lo extraño fue que, una vez pasado el rojo y en una zona donde, de acuerdo con el ojo, no se veían radiaciones, la temperatura seguía creciendo. Así se descubrió el infrarrojo, que se extiende hasta longitudes de onda del orden de 30 000 Å.

Por lo tanto, el ojo humano sólo es sensible a una parte del espectro, y éste se extiende hacia ambos lados en una extraordinaria gama de radiaciones. En realidad, el espectro luminoso visible más las zonas del ultravioleta y el infrarrojo, no es más que una estrecha porción del llamado espectro electromagnético, al que pertenecen las ondas de la radiotelefonía, los rayos X, las ondas de radar, los rayos gamma, etc. Todas estas radiaciones difieren entre sí nada más que en su longitud de onda.

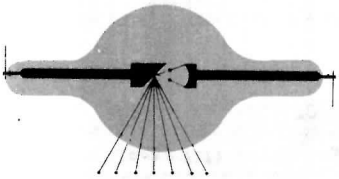
El mismo manuscrito fotografiado con película común (arriba) y con película sensible al infrarrojo (abajo).



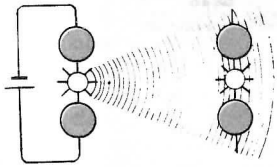


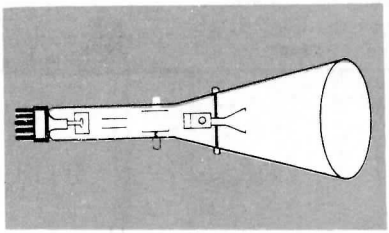
Rayos cósmicos: provienen del espacio. Muy penetrantes, pueden desintegrar átomos y núcleos, como en la ilustración de la izquierda. (Menos de 0,01 Å.)

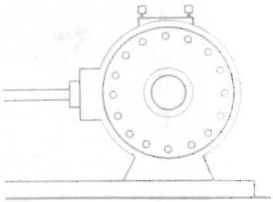
Rayos gamma: radiaciones emitidas en las reacciones nucleares. Se emplean a veces para el tratamiento del cáncer. El radium emite rayos gamma.



Rayos X: emitidos por átomos bombardeados por electrones rápidos. (De 1 Å a 1 000 Å.)
Luz ultravioleta: los rayos X y los ultravioleta se superponen en parte.
Luz visible: va del violeta al rojo. (Entre aproximadamente 4 000 Å y 8 000 Å.)
Luz infrarroja: los infrarrojos tienen usos particulares. (De 25 Å a 4 000 Å; de 4 000 Å a 8 000 Å; de 8 000 Å a 0,04 cm.)







Ondas de radio: son las ondas portadoras utilizadas en radio y televisión; van desde ondas ultracortas de unos centímetros a las muy largas de más de 1 kilómetro. (De 1 cm a 10^4 cm.)

Generadores de corriente alterna: en esta región del espectro electromagnético se encuentra la corriente alterna que sirve para iluminar y calentar las casas. (Más de 10^6 cm.)

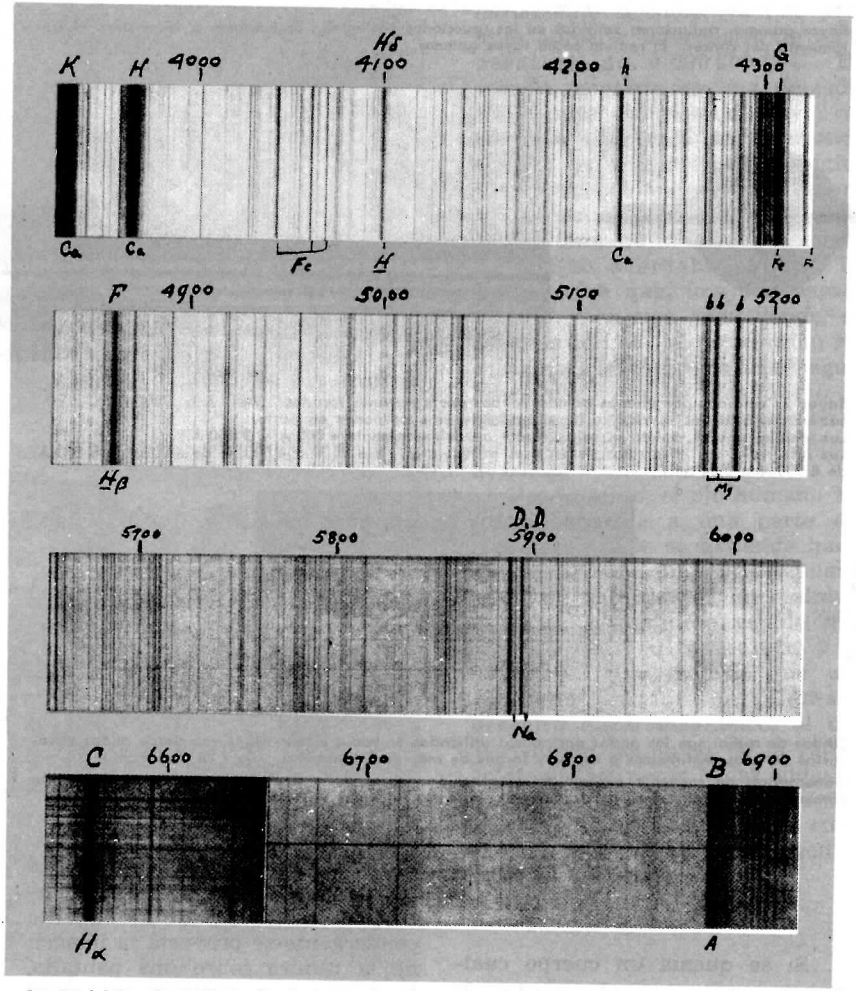
Espectros de emisión

Si se quema un cuerpo cualquiera, emite luz; el espectro de esta luz se llama *espectro de emisión del cuerpo*. Para observarlo nítidamente se ilumina con aquella luz una ranura, y con una lente convergente se proyecta la imagen de la ranura sobre una pantalla. Se coloca después un prisma en el camino del haz, obteniéndose so-

bre la misma pantalla el espectro. Si la luz es policromática, en la pantalla se obtienen tantas imágenes de la ranura como colores estaban "mezclados" en la luz emitida por el cuerpo al quemarse.

Espectros de absorción

Si en el haz de luz de la experiencia anterior se intercala una sustancia más o menos transpa-



Partes del espectro solar visible. Fotografiado con espectrógrafo de 13 pies. (Fotografía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

rente, en el espectro aparecen algunas regiones oscuras. Esas regiones corresponden a colores que han sido absorbidos por la sustancia; el espectro que así resulta se llama *espectro de absorción de la sustancia interpuesta.* Este espectro nos dice para qué colores es opaca la sustancia.

Las líneas de Fraunhofer

En 1802, Guillermo Wollaston vio en un espectro del sol varias líneas oscuras, casi negras, pero no comprendió el porqué de su presencia allí. Años más tarde José Fraunhofer mostró su importancia. Éste quería determinar con precisión el índice de refracción de distintos cristales y tropezaba con la dificultad de que un mismo cristal presentaba distintos índices de refracción según el color de la luz empleada. Pero, además, notó que *aun usando luz de un mismo color obtenía distintos valores del índice de refracción, según empleara un borde, el centro, o el otro borde de la franja que de ese color obtenía en el espectro.* La explicación surgió cuando, accidentalmente, comprobó que en los espectros obtenidos de distintas llamas luminosas había una raya muy fina y brillante en la zona del amarillo, que siempre aparecía en el mismo lugar del espectro, y la tomó como punto de referencia *para elegir el color de la luz* con la cual mediría índices de refracción.

Para obtener la línea amarilla con brillo más intenso, inspeccionó el espectro solar, recogiendo en un anteojo la luz que emergía del prisma. En el lugar en que debería haber aparecido la línea amarilla había una línea negra, y además innumerables líneas oscuras, unas anchas y otras delgadas, en toda la extensión del espectro. Preocupado como estaba por su problema de determinar bien la zona del espectro que emplearía para sus mediciones de índices, se le ocurrió tomarlas como puntos de referencia, como ya lo había hecho con la línea amarilla observada en los espectros de lámparas.

Líneas de emisión y líneas de absorción

El campo que se abría con estas observaciones de Fraunhofer no fue explorado inmediatamente. Casi 40 años más tarde, alrededor de 1860, Gustavo Kirchhoff estudió las observaciones de Fraunhofer y comenzó a experimentar con los espectros, empleando la luz de una llama, en la que quemaba distintas sustancias, entre ellas sal de cocina (cloruro de sodio).

Advirtió que los espectros que así obtenía no eran como los del sol, pues en lugar de estar formados por bandas que gradualmente iban cambiando de color, estaban compuestos por líneas brillantes, que tenían el color correspondiente a la zona del espectro que ocupaban. Los llamó por eso *espectros de líneas de emisión,* mientras que al conjunto de las líneas de Fraunhofer lo llamó *espectro de líneas de absorción.*

El nacimiento del análisis espectral

En el transcurso de sus experiencias, Kirchhoff observó que cada vez que producía un espectro de sustancias distintas, *pero en las que entraba, con otros, un mismo elemento químico, todos los espectros mostraban un mismo conjunto de líneas, siempre en las mismas zonas del espectro.* Ello significaba que:

Cada elemento químico tiene un espectro de líneas de emisión característico.

De este descubrimiento de Kirchhoff nació el *análisis espectral*: para saber qué elementos constituyen una sustancia, se examinan las líneas de emisión de su espectro.

El más simple de los espectros de líneas de emisión es el del sodio, que a primera vista está formado por una sola línea amarilla, precisamente la que había observado Fraunhofer; hoy se sabe que en realidad está formada por dos líneas muy juntas, y que en el espectro del sodio aparecen muchas líneas más.

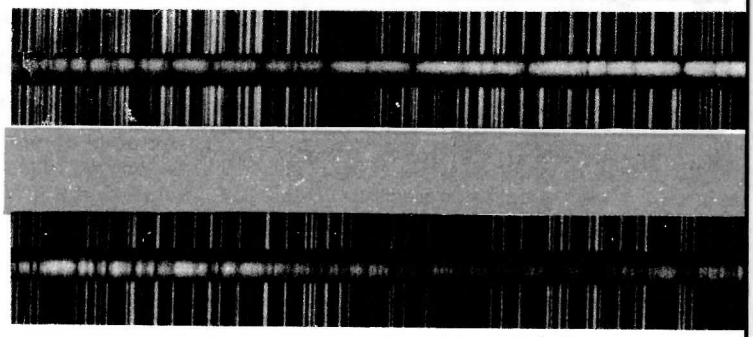
Explicación de las líneas de Fraunhofer

Kirchhoff había observado que la línea amarilla del sodio ocupaba exactamente el mismo lugar que la línea oscura llamada D por Fraunhofer, e hizo la siguiente experiencia: formó un espectro solar, pero en el camino de los rayos de luz, antes de que incidieran sobre el prisma, colocó una llama y quemó en ella sal común. Inmediatamente observó que la línea oscura D se tornaba más oscura aún que cuando no estaba la llama con sodio. Luego fue reduciendo la cantidad de luz solar que incidía sobre el prisma, con lo cual el espectro iba disminuyendo progresivamente su brillo, hasta que cuando este brillo fue suficientemente apagado, en el mismo lugar de la línea oscura D se vio, cada vez más brillante, la línea amarilla característica del sodio.

Repitió la experiencia empleando en lugar de luz solar una fuente de luz blanca intensa, y obtuvo el mismo resultado: cuando el haz de luz blanca incidía directamente sobre el prisma, obtenía un espectro continuo con todos los colores, y en la zona del amarillo no se observaba ninguna línea en particular; cuando el haz de luz blanca atravesaba una llama con sodio, en el amarillo aparecía la línea oscura D; si debilitaba la luz blanca, en el lugar de la línea D acababa por aparecer una intensa línea amarilla.

Repitió la experiencia con otras sustancias, y en todos los casos se repitieron los mismos hechos. La conclusión fue inmediata:

Las líneas oscuras del espectro se producen cuando el rayo de luz atraviesa una zona en la que hay, vaporizado, el elemento químico en cuyo espectro se encuentra esa misma línea, pero brillante.



Espectros de dos estrellas muy diferentes. Arriba): De la estrella de la constelación del Cisne. Abajo): De Betelgoso, la más roja del cuadrilátero de Orión. Los cuatro espectros iguales de líneas blancas son del hierro.

Análisis químico del Sol y las estrellas

La importancia de esta observación salta a la vista: si en el espectro del Sol encontramos una línea oscura en el lugar donde el sodio produce su línea amarilla, ello no puede significar sino que en la atmósfera de gas que rodea al Sol (fotosfera) hay vapor de sodio que absorbe la luz correspondiente a esa línea.

Se ha alcanzado algo que parecía completamente fuera de las posibilidades del hombre: ¡realizar un análisis químico del Sol! Porque, como es evidente, lo mismo que sucede con la línea D sucede con todas las líneas de Fraunhofer. Y lo mismo que con el Sol se puede hacer, y se hace, con todas las estrellas.

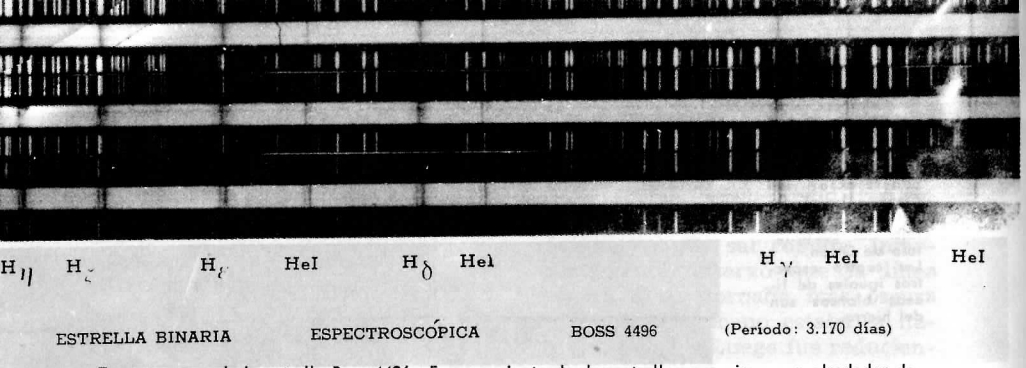
El descubrimiento del helio

Siempre existió el interrogante de si los elementos químicos que componen las sustancias de la Tierra constituirían también el Sol y las estrellas. El análisis espectral resolvió la cuestión. Se comprobó que, en general, las mismas sustancias que forman la Tierra integran todos los astros. Hubo sin embargo una "excepción": se descubrió en el Sol un elemento químico desconocido en la Tierra. Por esa razón se lo llamó *helio* (en griego, *helios* quiere decir Sol). Pero más tarde se comprobó que también había helio en la Tierra, y así desapareció la excepción. De modo, pues, que el análisis espectral permitió afirmar que los *elementos que constituyen la Tierra son los mismos que componen todo el universo.*

Los movimientos de las estrellas

Todo el que haya presenciado una carrera de automóviles, o simplemente haya escuchado su relación por radio, habrá notado que el ruido producido por el motor baja bruscamente de altura cuando el automóvil pasa frente al observador o al micrófono. También es fácil advertirlo en la calle con las bocinas de los automóviles: cuando el automóvil se acerca, el sonido de la bocina es más agudo que cuando se aleja. Ese fenómeno se conoce en física con el nombre de "efecto Doppler".

El efecto Doppler consiste en una variación de la frecuencia (o sea de la longitud de onda) de la perturbación, provocada por el movimiento de la fuente productora de ésta con respecto al obser-



ESTRELLA BINARIA ESPECTROSCÓPICA BOSS 4496 (Período: 3.170 días)

Tres espectros de la estrella Boss 4496. Es un conjunto de dos estrellas que giran una alrededor de la otra, con un período de 3,170 días, o sea 3 días 4 horas 5 minutos. El espectro superior fue tomado en la fase 0,973 del período, es decir, cuando prácticamente las dos estrellas están alineadas con nosotros. El segundo fue tomado en la fase 0,258, es decir, 1/4 de período, y muestra que cada línea del espectro anterior se ha desdoblado en dos: una estrella se aleja y la otra, en esa fase la más intensa, se acerca. El tercer espectro se tomó en la fase 0,708 y la componente más intensa se aleja, pues sus líneas están corridas hacia el rojo.

vador. Si el agente productor del sonido (por ejemplo, el motor del automóvil, o su bocina) se mantiene en reposo con respecto al observador, produce un sonido de determinada altura; *si se acerca* al observador, *la frecuencia aumenta* (o sea, la longitud de onda disminuye) y el sonido se hace más agudo; *si se aleja* del observador, *la frecuencia disminuye* (o sea, la longitud de onda aumenta), y el sonido se percibe más grave.

El efecto Doppler se observa también en la luz. Si la fuente luminosa está en reposo con respecto al observador, las líneas de su espectro ocupan la posición en que se las observa cuando se produce un espectro en el laboratorio. Si la fuente luminosa se mueve *hacia el observador*, de acuerdo con lo que hemos dicho deben aumentar las frecuencias de las distintas radiaciones que constituyen su espectro, es decir, disminuirán las longitudes de onda de las distintas líneas del espectro, lo que, dicho en otras palabras, deberá tener como consecuencia un corrimiento de todas las líneas *hacia el extremo violeta* del espectro.

Por el contrario, si la fuente de luz *se aleja* del observador, se producirá un corrimiento *hacia el extremo rojo*. Advirtamos que para que sea posible notar el desplazamiento de las líneas espectrales, la fuente luminosa debe estar dotada de una velocidad no inferior a algunos kilómetros por segundo, es decir, superiores a unos miles de kilómetros por hora.

En los espectros de las estrellas se ha podido advertir claramente el efecto Doppler y su influencia en el desplazamiento de las líneas, y con ello se ha podido medir la velocidad con que cada estrella se acerca o se aleja de la tierra. En general, se ha comprobado que las velocidades con que se mueven las estrellas respecto de la tierra, acercándose o alejándose, son inferiores a los 60 km/s.

Descubrimiento de estrellas dobles mediante espectros

El anteojo astronómico ha permitido descubrir que lo que mirando a ojo descubierto parece ser una sola estrella, en algunos casos son dos estrellas muy juntas –lo que en astronomía se llama una *estrella doble*–, como sucede con la estrella más brillante de la Cruz del Sur.

Pero en algunos casos la distancia a nosotros es tan grande, o las componentes de la estrella doble están tan aproximadas, que ningún anteojo puede mostrarlas separadas. Sin embargo, se ha podido afirmar que tal estrella es doble sin haber visto nunca más que una sola, por las observaciones realizadas en su espectro. En efecto: las componentes de una estrella doble siempre están en rotación alrededor del centro de gravedad del sistema que forman; por lo tanto, en determinado momento de su rotación una de las componentes se estará acercando a nosotros, mientras que la otra simultáneamente se aleja. Y en otro momento, cuando una esté pasando por la posición más cercana a la Tierra, y la otra por la más lejana, ni se acercan ni se alejan. Es evidente que todas esas variaciones se traducen en "corridas" de las líneas de su espectro, de acuerdo con lo que nos permite prever el efecto Doppler.

En efecto: cuando se esté en el último de aquellos casos, las líneas del espectro estarán en el lugar que les corresponde; pero cuando una de las componentes se esté acercando mientras la otra se aleja, las líneas de la primera se correrán hacia el violeta, y las de la segunda hacia el rojo. Se obtendrá así un espectro en el que *cada línea aparecerá doble.*

De modo que si los espectros de una misma estrella presentan en distintos momentos líneas dobles, la estrella debe ser doble, aun cuando el telescopio más potente no muestre sus componentes.

¿Cómo se produce el espectro de una sustancia?

Al formar el espectro de una sustancia se observa que:

a) *el conjunto de líneas que constituyen el espectro es independiente de la cantidad de sustancia que se haya empleado para obtenerlo;*

b) *las distintas combinaciones químicas en que entra un mismo elemento químico no afectan fundamentalmente al espectro característico de ese elemento.*

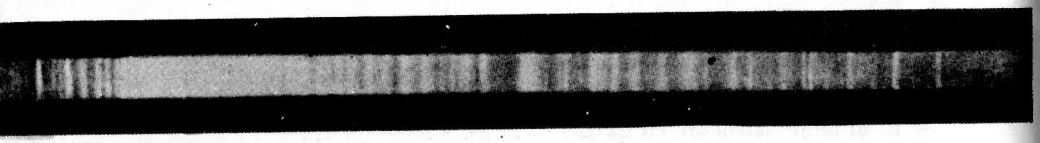
Estas dos observaciones permiten afirmar que:

El origen del espectro de una sustancia se halla en sus átomos.

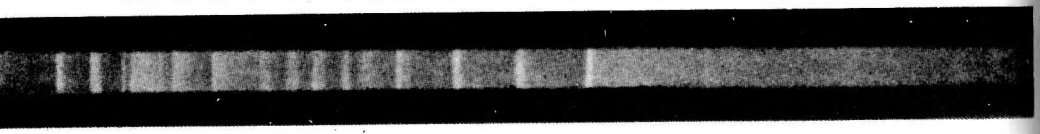
Esto obliga que cualquier modelo que se invente para describir cómo es un átomo, debe ser capaz de explicar las líneas espectrales producidas por los átomos de cada elemento químico.

Influencia de las moléculas

Cuando se forma el espectro de una llama en que se vaporiza una sustancia, se obtiene el espectro de



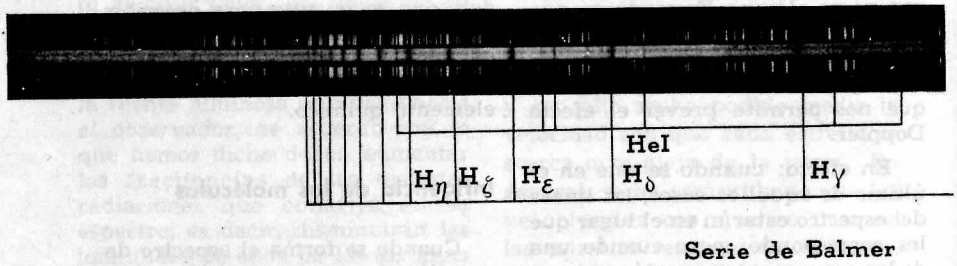
Espectro de bandas del anhídrido carbónico.



Espectro de bandas del óxido de carbono.

líneas de emisión características de la sustancia vaporizada, pero también se observa un fondo de bandas. A este último se lo llama *espectro de bandas*, y es producido por las moléculas de las sustancias presentes en la llama. Por ejemplo: el carbono en estado gaseoso produce un espectro de líneas de emisión que lo caracteriza; el oxígeno produce el suyo; pero en ambos casos, el espectro es producido por los átomos. Pero el espectro del monóxido de carbono (CO) presenta ciertas bandas que son características de esa sus-

El espectro de la estrella Beta Crucis (la segunda en brillo de la Cruz del Sur) es el central, conjunto de líneas verticales oscuras sobre fondo blanco. Los dos conjuntos de líneas verticales blancas sobre fondo negro, uno por encima y otro por debajo, son espectros del hierro que sirven para comparar sus líneas –cuya longitud de onda se conoce muy bien– con las del espectro estelar, y así poder calcular la longitud de onda de cada línea de la estrella.



Serie de Balmer

tancia; si se obtiene el espectro del dióxido de carbono (CO_2), se observa otro espectro de bandas, característico del dióxido, que tiene algunas bandas comunes con el espectro del monóxido. Estos últimos espectros son producidos no por los átomos, sino por las moléculas.

Una inspección más cuidadosa de las aparentes bandas coloreadas continuas muestra que están formadas por una gran cantidad de líneas, muy apretadas unas con otras.

Las series espectrales

Los espectros de líneas de emisión de algunos elementos tienen algunas decenas de líneas; los de otros, centenares y otros como el del hierro, millares de líneas. Pero a simple vista se advierte en algunos casos, como en el espectro del hidrógeno, cierta regularidad en la posición de las líneas, lo que revela que alguna ley vincula las longitudes de onda de las distintas líneas.

En 1885 Balmer descubrió que las longitudes de onda de todas las líneas del espectro del hidrógeno se podían obtener de la fórmula

$$\lambda = 3\,645{,}6\,\frac{n^2}{n^2 - 4}$$

siendo $n = 3, 4, 5, 6, \ldots$, para la primera, la segunda, la tercera, la cuarta, etc., líneas de la serie del hidrógeno, a la que se llamó desde entonces *serie de Balmer*.

Más tarde Rydberg estudió las series espectrales, y encontró que las líneas que forman los espectros de todos los elementos pueden agruparse en distintas series, una de las cuales es la de Balmer, y dio la fórmula con la que pueden calcularse las longitudes de onda de todas las líneas de cada serie y de todas las series:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2_1} = \frac{1}{n^2_2}\right)$$

$R = 109\,677$ es la llamada "constante de Rydberg".

Si a n_1 se le da el valor $n_1 = 2$ y se lo mantiene fijo mientras a n_2 se le van dando valores $n_2 = 3, 4, 5, \ldots, \infty$, se obtienen las longitudes de onda de líneas de la *serie de Balmer*.

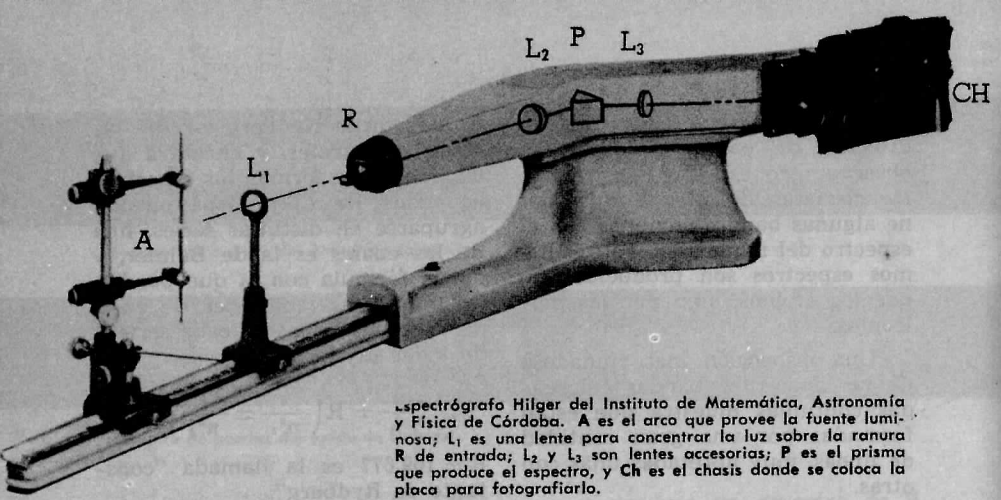
Si a n_1 se le da el valor $n_1 = 1$ y se lo mantiene fijo mientras a n_2 se le van dando valores $n_2 = 2, 3, 4, \ldots, \infty$, se obtienen las longitudes de onda de las líneas de otra serie espectral, llamada de *Lyman*.

Y así, variando los valores de n_1 y n_2 se pueden obtener todas las líneas posibles. Hoy, todas las líneas de todos los espectros de sustancias conocidas se hallan perfectamente estudiadas.

Producción y análisis de espectros de emisión

Hemos dicho que la luz emitida por un compuesto químico presenta el espectro característico de los elementos químicos componentes.

El análisis químico espectral *cualitativo* tiene por objeto revelar la presencia de cada elemento

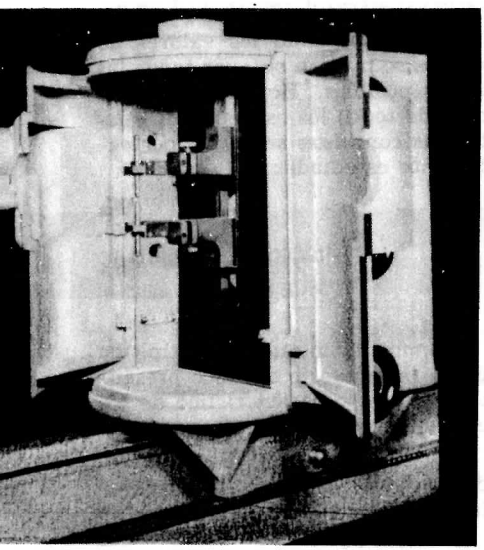


Espectrógrafo Hilger del Instituto de Matemática, Astronomía y Física de Córdoba. A es el arco que provee la fuente luminosa; L_1 es una lente para concentrar la luz sobre la ranura R de entrada; L_2 y L_3 son lentes accesorias; P es el prisma que produce el espectro, y Ch es el chasis donde se coloca la placa para fotografiarlo.

componente de la muestra, mediante la individualización de su conjunto de líneas característico en el espectro obtenido.

El análisis químico espectral *cuantitativo* tiene por objeto determinar la cantidad de cada elemento presente en la muestra, por la medición y comparación de la intensidad luminosa de las líneas que caracterizan a cada elemento.

Carbones del arco del espectrógrafo Baird.



Las fuentes de luz

Para obtener el espectro es necesario que la muestra en estudio emita luz. Se lo puede hacer por varios medios:

1) Vaporizando la muestra en una llama. (Espectro de llama.)

2) Si se juntan las puntas de dos carbones en forma de lápiz, que están conectados a una tensión de unos 100 ó 200 volts, al separarlos lentamente salta entre ellas un arco luminoso muy intenso. Es lo que se llama "arco eléctrico". Su luz muestra, naturalmente, el espectro del carbono. Si en las puntas de los carbones se coloca, aun en muy pequeña cantidad, la sustancia que se quiere estudiar, aparecen en el espectro sus líneas características. (Espectro de arco.)

3) A través de la muestra se hace saltar una chispa, provoca-

da por una diferencia de tensión de unos 50 000 volts. (Espectro de chispa.)

4) Si se trata de un vapor de gas, se le puede hacer emitir luz provocando una descarga en el tubo que lo contiene, a presión muy baja (del orden del cm de Hg).

El espectrógrafo

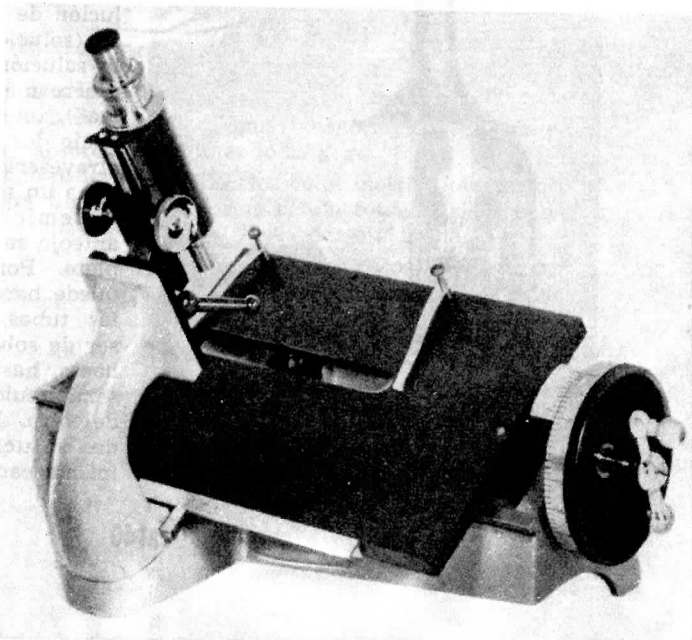
El espectroscopio es un aparato que separa las radiaciones de longitudes de onda diferentes, formando un espectro que puede ser observado visualmente.

Un espectrógrafo es un aparato destinado a producir *espectrogramas*, es decir, fotografías de los espectros.

Cómo se miden las líneas

Simultáneamente con el espectro a estudiar, en la placa fotográfica se imprime el espectro del hierro (véanse los espectrogramas de pág. 134), que es extraordinariamente rico en líneas. Todas ellas están medidas (sus longitudes de onda) con toda la precisión alcanzada por la técnica moderna.

El espectrograma se coloca en un aparato llamado *comparador*, donde se lo observa con un anteojo o se emplea un espectro proyector. Con un tornillo se puede mover un índice (que es un hilo delgadísimo, paralelo a las líneas). Para medir la longitud de onda correspondiente a una determinada línea del espectrograma, se coloca el índice sobre una línea conocida del espectro del hierro; luego se da vuelta al tornillo, hasta que el índice se superponga sobre la línea que se quiere medir. En un tambor queda señalada la distancia recorrida por el índice, la que, de acuerdo con la escala del espectrograma, se reduce a longitudes de onda. Lo recorrido por el índice es la diferencia entre la longitud de onda correspondiente a la línea del hie-



Comparador Hilger del IMAF. La placa fotográfica con el espectro se coloca sobre la plataforma oscura y se la sujeta firmemente con las láminas elásticas. Con el microscopio se observan las líneas, y con el tornillo micrométrico de la derecha se puede desplazar todo el carro, conservando fijo el microscopio. La posición de las líneas se mide con un error menor que 1 micrón.

rro empleada y la línea desconocida.

En otros sistemas se emplean células fotoeléctricas para detectar la presencia o ausencia de las líneas, y simultáneamente su intensidad, como en el cuantómetro.

Análisis químico por absorción de la luz

Cuando un rayo de luz atraviesa un medio transparente, su intensidad disminuye progresivamente. Por diáfano que sea ese medio, siempre absorbe parte de la luz que lo atraviesa. La cantidad de luz absorbida depende de varios factores: 1) de la clase del medio atravesado; 2) del espesor del medio; 3) de la intensidad de la luz incidente; 4) de la longitud de onda de la luz empleada.

Esos cuatro factores se traducen en la siguiente fórmula:

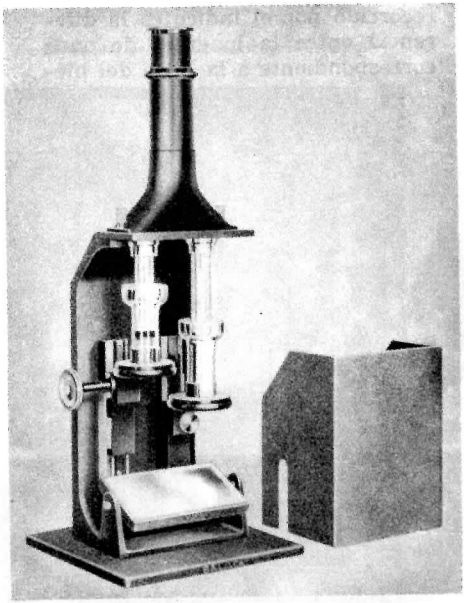
$$\Delta I = a I x \qquad \text{(Ley de Beer)}$$

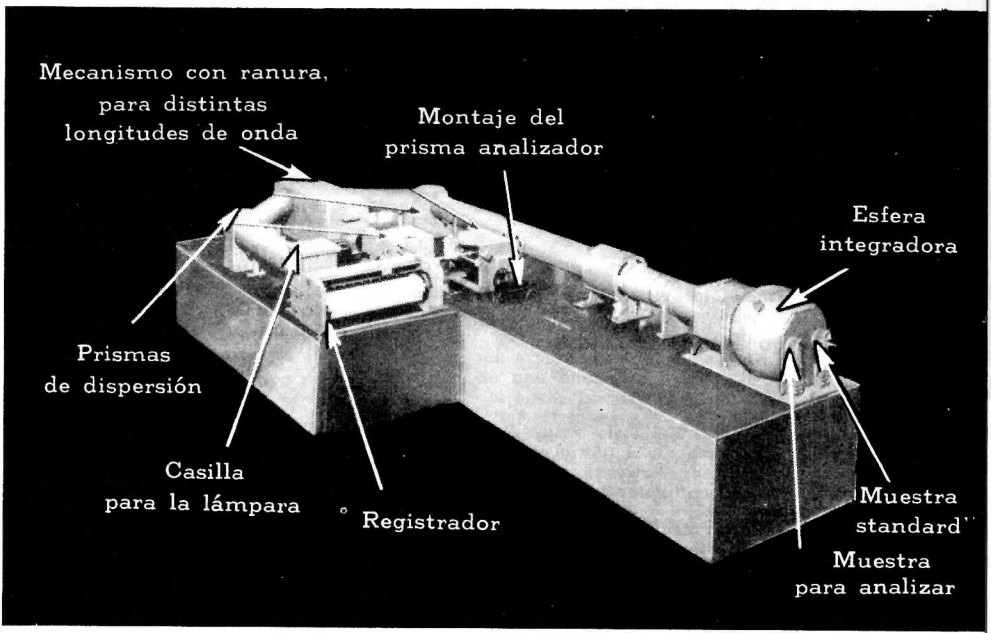
En esta fórmula, ΔI representa la disminución de la intensidad de la luz después de haber atravesado el medio transparente; a es un factor que representa la influencia del medio y del color de la luz empleada (se lo llama coeficiente de absorción); x es el espesor atravesado por la luz.

El colorímetro es un aparato basado en la fórmula anterior, y destinado a medir la concentración de determinada sustancia en una solución.

En uno de los tubos que se ven en la fotografía se coloca una solución de concentración c_2 conocida (solución "patrón"); en el otro, la solución cuya concentración c_1 quiere medirse (solución "problema"); un haz de luz ilumina desde abajo los dos tubos; después de atravesarlos, uno de los haces ilumina un semicírculo, y el otro haz el semicírculo restante. Con el anteojo se observa el círculo completo. Por medio de tornillos se puede hacer variar la longitud de los tubos, y con ellos el espesor de solución atravesado por los haces, hasta observar que los dos semicírculos no se distingan uno del otro. En esas condiciones, las dos soluciones han absorbido la misma cantidad de luz:

Colorímetro biológico.





Moderno espectrofotómetro registrador.

$$\left.\begin{aligned} \Delta I_1 &= a_1 \cdot I_1 \cdot x_1 \\ \Delta I_2 &= a_2 \cdot I_2 \cdot x_2 \end{aligned}\right\} \therefore\ a_1 \cdot x_1 = a_2 \cdot x_2$$

$$(1)\ \text{pues} \begin{cases} I_1 = I_2 \\ \Delta I_1 = \Delta I_2 \end{cases}$$

Los coeficientes de absorción de dos soluciones que sólo difieren en la concentración, son directamente proporcionales a sus concentraciones:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{c_1}{c_2} \therefore\ c_1 = \frac{a_1}{a_2}\, c_2 \qquad (2)$$

De (1) y (2)

$$c_1 = \frac{x_2}{x_1} \cdot c_2$$

Como se conoce c_2, se calcula c_1 midiendo x_1 y x_2.

En los colorímetros fotoeléctricos, una célula fotoeléctrica realiza la tarea del ojo humano.

En todos los casos debe tenerse muy en cuenta la longitud de onda más adecuada para trabajar.

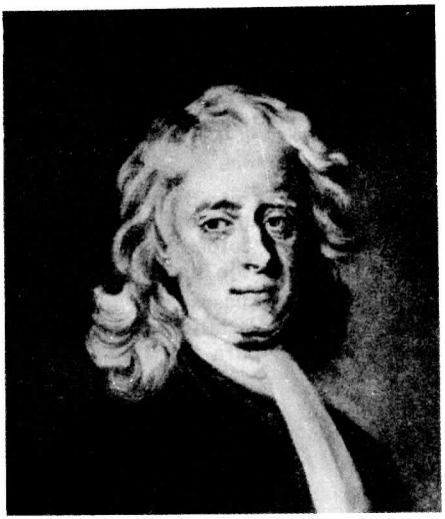
10 LA NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

Diálogo entre dos sabios

Época: fines del siglo XVIII. *Personajes: N, adepto de la teoría corpuscular de la luz, de Newton, y H, adepto de la teoría ondulatoria, de Huygens.*

N. — En verdad, no sé por qué se obstinan tanto en formular otra hipótesis acerca de la naturaleza de la luz. La de Newton es clara y terminante: *la luz consiste en pequeñísimos corpúsculos que salen del cuerpo luminoso y cruzan el espacio con una velocidad fantástica.*

Isaac Newton, por E. Seeman.



H. — No es obstinación. Newton afirma que la luz es de carácter corpuscular; Huygens, que es de carácter ondulatorio. Ambas teorías están bien fundamentadas, y no se trata de decidirse por la más "simpática", sino por la que explique mejor *todos* los fenómenos luminosos.

N. — Completamente de acuerdo; escrimiendo cada uno *su* teoría, analicemos una por una las distintas cuestiones y llegaremos a una conclusión satisfactoria.

H. — Pues comenzad: ¿Cómo explicáis la reflexión de la luz?

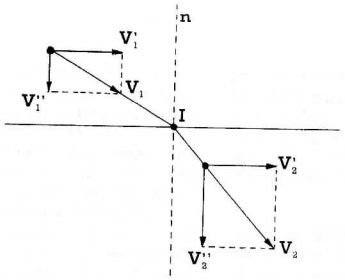
N. — Muy sencillamente: los corpúsculos chocan contra un espejo y se reflejan en él según las leyes del choque, que bien podéis advertir en una mesa de billar . . .

H. — Pues la teoría de Huygens no le va en zaga en cuanto a sencillez y coherencia: cuando la onda luminosa llega al espejo, se refleja en él, tal como las ondas de agua lo hacen en los bordes de un estanque, cosa que, debéis concederme, se advierte con igual facilidad que en vuestro ejemplo de la mesa de billar . . . Ambas teorías explican satisfactoriamente la reflexión; pero en el fenómeno de la refracción . . .

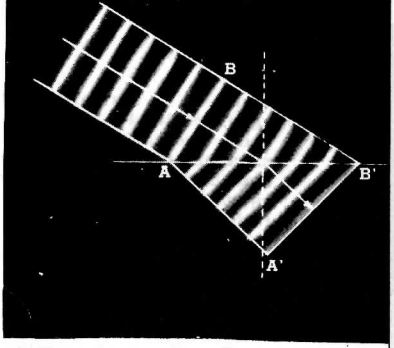
N. — *(Interrumpiéndolo con vehemencia):* ¡Ah! En cuanto a ese punto, no podréis dejar de convenir conmigo en que la explicación corpuscular es admirable . . .

H. — . . . lo que no impide que pueda ser falsa . . .

Cómo se refracta un rayo de luz, imaginándolo de naturaleza corpuscular.



Cómo se refracta un rayo de luz, imaginándolo de naturaleza ondulatoria.



N. — Permitidme que os haga una síntesis, y os ruego me señaléis el punto débil... ¡si podéis hallar uno!

H. — Comenzad...

N. — Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro más refringente, como del aire al agua, se acerca a la normal. Descomponed el vector velocidad del corpúsculo en dos direcciones: una, paralela a la superficie; otra, normal a ella. Hacedlo cuando el corpúsculo está aún en el aire, y cuando está ya en el agua.

La velocidad de la partícula en el aire es V_1, y sus componentes son V'_1 y V''_1. La velocidad del corpúsculo en el agua es V_2, mayor que V_1...

H. — Afirmación totalmente gratuita, pues no podéis probarla...

N. — Esperad. La velocidad de la luz en el agua es V_2, y sus componentes son V'_2 y V''_2. No existe razón alguna para que la componente tangencial haya variado, de modo que $V'_1 = V'_2$. Y advertid ahora que la única manera, oídlo bien: la ÚNICA MANERA, de que el rayo se acerque a la normal, es que la componente V''_2 sea mayor que la V''_1, lo que, a su vez, exige que la velocidad en el agua sea mayor que en el aire. ¿Podéis objetar algo?

H. — Que es la única manera de explicarlo, decís bien... cuando se ha partido de la base de que la luz está constituida por corpúsculos.

N. — Conozco la explicación ondulatoria de la refracción, y...

H. — Permitidme, a mi vez, una síntesis de la interpretación ondulatoria de la refracción, y señaladme puntos débiles... ¡si podéis!

N. — De acuerdo.

H. — La luz se propaga con mayor velocidad en el aire que en el agua, y...

N. — Afirmación totalmente gratuita...

H. — Esperad y veréis la solidez de mi argumentación. Imaginad el frente de una onda que llega a la superficie del agua. Limitémosla, para mayor sencillez, al trozo AB. Admitid que cuando A llega a la superficie, a B le falta 1 segundo para llegar, lo que significa que el segmento BB' representa la velocidad de la luz en el aire.

N. — Lo admito; no hay inconveniente en ello.

H. — Cuando haya transcurrido 1 segundo, la onda habrá penetrado íntegramente en el agua. El punto A se hallará en A', y el segmento AA' representará la velocidad de la luz en el agua. Y advertid que, como el rayo se

Cristian Huygens, grabado de Edelinck.

acerca a la normal al penetrar en el agua, resultará AA' menor que BB', es decir, que el fenómeno de la refracción EXIGE QUE LAS ONDAS LUMINOSAS SE PROPAGUEN CON MAYOR VELOCIDAD EN EL AIRE QUE EN EL AGUA. ¿Tenéis alguna objeción que formular?

N. — Todo es correcto desde el punto de vista lógico, pero el punto de partida, la naturaleza ondulatoria de la luz, no podéis demostrármelo.

H. — Convenid conmigo en que hasta ahora tanto la teoría de Newton como la de Huygens explican satisfactoriamente los hechos físicos de la reflexión y la refracción. Pero hemos llegado a un punto decisivo: para explicar la refracción de la luz, la teoría corpuscular exige que la velocidad de la luz sea mayor en el agua que en el aire. Y para explicar el mismo fenómeno, la teoría ondulatoria exige que sea mayor la velocidad en el aire.

N. — Es de lamentar que aún no se haya podido medir la velocidad de la luz, pues ésa sería una experiencia crucial.

H. — Así es: cuando se la pueda medir en el aire y en el agua, se tendrá una prueba decisiva sobre cuál de las dos teorías es la correcta. Pero, mientras tanto, permitidme que os pregunte algo fundamental: ¿cómo explica vuestro maestro el fenómeno –por él mismo descubierto– de la descomposición de la luz blanca en los colores del espectro?

N. — Pues, a cada color le atribuye una clase de corpúsculos de distinto tamaño, y la luz blanca sería una mezcla homogénea de ellos; la separación de los colores en el prisma se produce porque los corpúsculos más grandes, al ser atraídos con más fuerza por la materia de que está hecho el prisma, se desvían más que los más chicos.

H. — Convendréis conmigo en que esta explicación no es ya tan sencilla como las anteriores: no sólo se requiere que la luz esté formada por corpúsculos, sino que además hay que admitir que hay tantas clases de corpúsculos como colores. Ved, en cambio, cómo en la teoría ondulatoria el fenómeno de la dispersión luminosa se explica muy simplemente: es bien sabido que los sonidos se diferencian entre sí por el número de vibraciones; a la nota musical sol, por ejemplo, le corresponde un número de vibraciones distinto que a la nota re. Yo imagino que lo mismo pasa con los colores, y que al rojo, por ejemplo, le corresponden más vibraciones que al violeta*. La luz blanca es una mezcla de todas esas vibraciones luminosas, algo así como el sonido que se obtendría tocando simultáneamente todas las notas de la escala musical. En el prisma se produce la separación de los colores, porque cada color viaja con una velocidad diferente, y . . .

N. — No prosigáis; en primer lugar, porque para comprobar lo que vos afirmáis deberíamos conocer las velocidades de propagación de cada color, y eso no se ha hecho aún; y en segundo lugar, porque aunque admitiera que en este aspecto la teoría de Huygens es más elegante que la de Newton, os formularé reparos tan decisivos a otros aspectos de la teoría ondulatoria, que no tendréis más remedio que reconocer vuestra derrota.

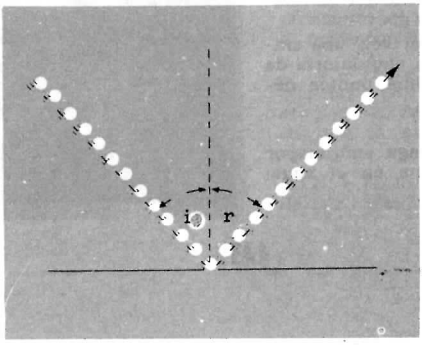
H. — Veámoslos.

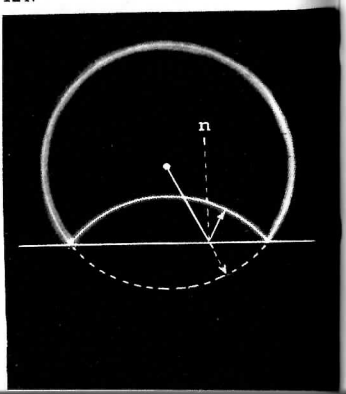
N. — En primer lugar, si la luz fuera un fenómeno ondulatorio, en ciertas condiciones deberían producirse fenómenos de interferencia, como acontece con las ondas sonoras y las formadas en la superficie de los líquidos. ¿Imagináis algo tan ridículo como aceptar que, "en ciertas condiciones" (os dejo elegir las que queráis . . .), una habitación

* Véase pág. 124.

Cómo se refleja un rayo de luz, imaginándolo de naturaleza corpuscular.

Cómo se refleja un rayo de luz, imaginándolo de naturaleza ondulatoria.





alumbrada por una bujía quede en penumbras . . . al encender otra bujía?

H. — Confieso que me ponéis en apuros. Pero el hecho de que *todavía* no se haya observado interferencia con la luz, no significa que el fenómeno no exista. Por otra parte, no hay por qué esperar que sea tan simple como vos decís: "una bujía que anula a otra bujía". Como lo sostiene mi maestro, las ondas de luz son muchísimo más chicas que las ondas sonoras, por lo cual no debe extrañarnos que la interferencia luminosa sea algo muy difícil de observar.

N. — Hay aún otras objeciones: si la luz se propagara en forma de ondas, no siempre lo haría en línea recta. Lo diré con palabras del mismo Newton: "Si la luz consistiera totalmente en una presión, o en un movimiento propagado instantáneamente o progresivamente, se encorvaría en la sombra; pues en un fluido, una presión o un movimiento no puede propagarse en línea recta más allá del obstáculo que detiene una parte del movimiento: hay inflexión y dispersión hacia todos los lados en el medio en reposo situado más allá del obstáculo . . . una campana o un cañón pueden ser oídos detrás de la colina que intercepta la vista del cuerpo sonoro; y los sonidos se propagan también a través de tubos encorvados, mientras que jamás se ve a la luz seguir rutas tortuosas, ni desviarse hacia las sombras . . .".

En otras palabras: si la luz fuera un movimiento ondulatorio, debería observarse, como en todo movimiento ondulatorio, el fenómeno de difracción.

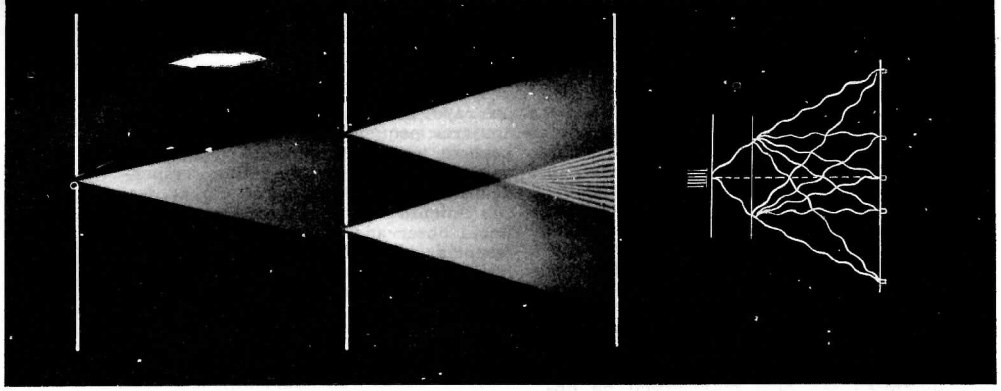
H. — Como en la interferencia, creo que la difracción luminosa es de difícil observación, debido a la pequeñez de la onda de luz. De todas maneras, reconozco que aún faltan esas decisivas pruebas experimentales para afirmar la teoría de Huygens, pero sin duda llegará el día en que se las encuentre.

Hasta aquí el diálogo de nuestros sabios. En realidad, debemos aclarar que a fines del siglo XVIII no faltaban hechos experimentales en qué apoyar definitivamente la teoría de Huygens. Se los había observado, pero sin interpretarlos correctamente. Ya en 1665 el sacerdote jesuita Grimaldi observó la difracción de la luz: le llamó la atención que un rayo luminoso que atravesaba dos agujeros pequeños, al iluminar una superficie lo hiciera en una zona mayor que la que geométricamente corresponde. El mismo Newton conoció el descubrimiento de Grimaldi, y también había observado el fenómeno de interferencia, pero la concepción corpuscular, que dominaba en su mente, le impidió advertir el significado de esos fenómenos.

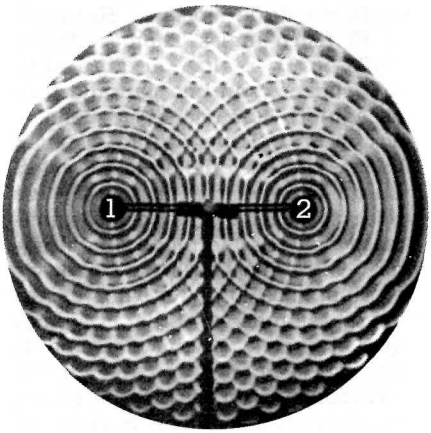
Luz + luz = oscuridad

Con el tiempo comenzaron a realizarse experiencias que fueron confirmando la teoría de Huygens.

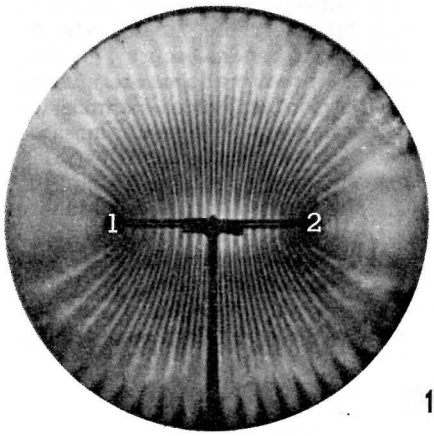
El físico inglés Thomas Young (1773-1829) realizó el siguiente experimento: en una pantalla hizo un agujero sumamente pequeño, y dos en otra. Estos últimos estaban lo más juntos que pudo hacerlos. Luego hizo incidir un haz de luz solar sobre el agujerito de la primera pantalla, de modo que el cono de luz que pasaba a través de él iluminara los dos agujeritos de la segunda pantalla. Dejemos que el mismo Young describa lo que vio y cómo lo interpretó. (Traducimos un párrafo de su comunicación a la Royal Society, en 1803): "Cuando los dos haces (los que atraviesan los agujeritos de la segunda pantalla) se reciben por una superficie colocada de modo que los intercepte, su luz está dividida por bandas oscuras, en porciones aproximadamente iguales. La porción central es siempre luminosa, y las bandas luminosas a cada lado están a distancias tales, que la luz proveniente de una de las aberturas debe haber pasado a través de una distancia más larga que la que proviene del otro, y la diferencia de los caminos recorridos es igual al largo de una, dos, tres, o más de las supuestas ondu-



La experiencia de Young. Cómo llegan los rayos a los lugares donde se refuerzan.



Interferencias en la superficie del mercurio. Estos ejemplos de interferencias con ondas en superficies de líquidos permiten comprender mejor las ondas de luz.



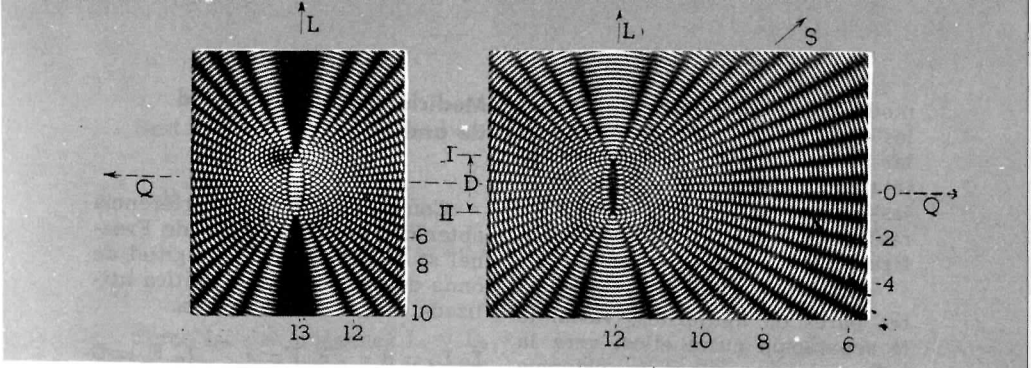
laciones; mientras que las bandas oscuras que intervienen corresponden a una diferencia de media de las supuestas ondulaciones, o una y media, o dos y media, o más".

Como vemos por sus propias palabras, Young, partidario de la teoría ondulatoria, supuso que la presencia de esas bandas oscuras no era otra cosa que un fenómeno de interferencia de ondas. Los rayos provenientes de cada agujero llegan a las zonas de las bandas oscuras en forma tal que, si uno de ellos pretende producir una vibración en un sentido, el otro pretende hacer lo mismo en sentido opuesto, y ambas vibraciones se anulan. En cambio, hay puntos a los cuales los rayos llegan de modo que sus efectos se suman, y ellos constituyen las franjas luminosas.

¿Dónde se anulan los rayos? Donde sus *efectos* son opuestos, es decir, en aquellos puntos a los que llegan con una diferencia de camino igual a

$$1\frac{\lambda}{2},\quad 3\frac{\lambda}{2},\quad 5\frac{\lambda}{2},\quad \ldots\quad ,\quad (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

es decir, un *número impar de semilongitudes de onda.*



Dos representaciones de interferencias entre ondas emitidas por dos centros emisores puntuales. Los de la izquierda distan entre sí un número impar de semilongitudes de onda; los de la derecha, un número par.

Esta experiencia, con otras que omitimos, llevaron a Young a formular las siguientes conclusiones:

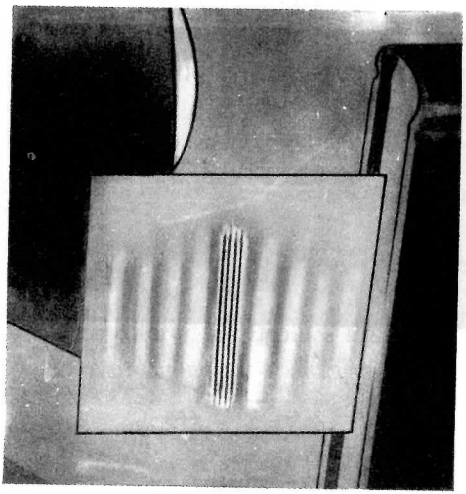
1) *La hipótesis de Huygens es cierta, pues de otra manera no podrían superponerse rayos provenientes de los dos agujeritos.*

2) *Entre los rayos provenientes de los dos agujeritos se produce interferencia, única manera de explicar las bandas oscuras alternadas con bandas claras.*

Por lo tanto, LA LUZ ES UN FENÓMENO ONDULATORIO.

Cómo observar la interferencia luminosa

En una tarjeta hágase un corte, con una hoja de afeitar, de unos 3 cm de largo y unos 0,2 ó 0,3 mm de ancho. En otra tarjeta háganse dos agujeritos, muy pequeños y muy juntos, con un alfiler. Colóquese la primera tarjeta muy cerca de una lámpara eléctrica, y obsérvese la ranura a través de los dos agujeritos, colocando la tarjeta lo más cerca posible del ojo, y de



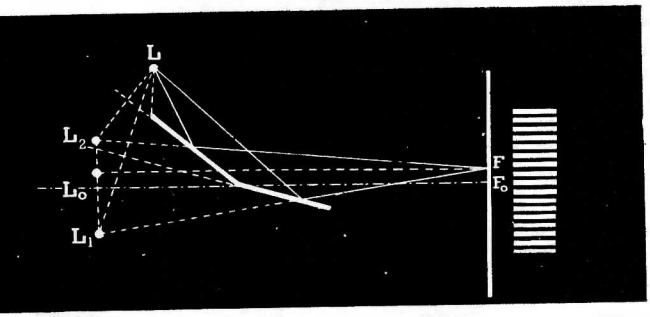
Arriba): Cómo disponer los elementos para observar franjas de interferencia. Abajo): Cómo se ven las franjas de interferencia: son las líneas finas y apretadas, que no deben confundirse con las más separadas, a ambos lados de la ranura que son franjas de difracción.

modo que la recta determinada por los dos agujeritos sea perpendicular a la ranura de la primera tarjeta. Se verá un conjunto de franjas delgadas, alternadamente claras y oscuras, como muestra la figura.

Ensaye el lector con diferentes pares de agujeritos, variando la separación entre ellos; verá la influencia que ejerce la distancia entre ellos sobre el ancho de las franjas de interferencia.

Los espejos de Fresnel

Agustín Fresnel (1788-1827), joven ingeniero militar francés, se interesó mucho en los problemas concernientes a la naturaleza de la luz, y sus extraordinarios trabajos sobre el tema afirmaron vigorosamente la teoría ondulatoria. Fresnel ideó un procedimiento muy ingenioso para producir interferencias. Se colocan dos espejos adosados de modo que formen un ángulo muy cercano a 180°. Cerca de ellos se coloca un foco luminoso L, del cual los espejos dan una imagen cada uno, L_1 y L_2.



La experiencia de Fresnel.

Medición de una longitud de onda

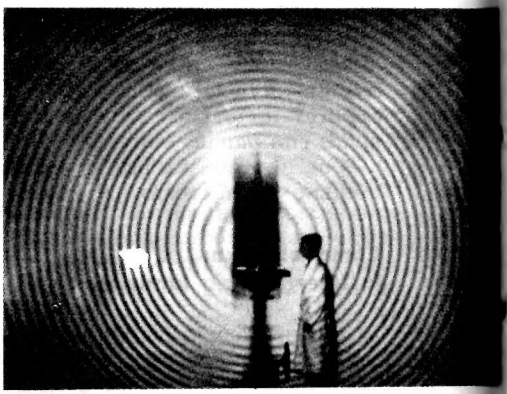
Con las franjas de interferencia obtenidas con los espejos de Fresnel se puede medir la longitud de onda de la luz monocromática utilizada. En efecto, hagamos:

$$L_1 L_2 = d \qquad F_o F = i \qquad L_o F_o = D$$
$$L_1 F = x_1 \qquad L_2 F = x_2$$

Por el teorema de Pitágoras:

$$x_1^2 = \left(\frac{d}{2} + i\right)^2 + D^2$$

$$x_2^2 = \left(\frac{d}{2} - i\right)^2 + D^2$$



Experiencia de interferencia de haces reflejados en las dos caras de delgadísimas láminas de mica. (Según R. W. Pohl.)

Restando miembro a miembro:

$$x_1^2 - x_2^2 = \left(\frac{d}{2} + i\right)^2 - \left(\frac{d}{2} - i\right)^2 = 2\,d\,i$$

$$(x_1 + x_2)\,(x_1 - x_2) = 2\,d\,i$$

Como las dos imágenes L_1 y L_2 están muy cercanas a L_0, y como $D = L_0 F_0$ es muy grande comparada con d (es del orden de 1 000 veces mayor), se comete un error despreciable si en lugar de $x_1 + x_2$ se pone 2 D:

$$2\,D\,(x_1 - x_2) = 2\,d\,i \;\therefore$$

$$\therefore\; x_1 - x_2 = \frac{d\,i}{D} \qquad (1)$$

La condición para que haya oscuridad es:

$$x_1 - x_2 = (2\,k + 1)\,\frac{\lambda}{2} \qquad (2)$$

Para la primera franja oscura (al lado de la luminosa central) es $k = 0$, de modo que en (2):

$$x_1 - x_2 = (2 \cdot 0 + 1)\,\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \qquad (3)$$

De (1) y (3):

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d\,i}{D} \;\therefore\; i = \frac{\lambda\,D}{2\,d}$$

Para la primera franja oscura del otro lado de la central se tiene el mismo valor de i, de modo que la distancia entre dos franjas oscuras consecutivas es:

$$I = \frac{D}{d}\,\lambda \;\therefore\; \boxed{\lambda = \frac{d\,I}{D}}$$

Para calcular la longitud de onda de la luz empleada hay que medir, pues, la distancia entre las dos imágenes de la fuente luminosa empleada, la distancia desde ellas hasta la pantalla (que es prácticamente la de la fuente a la pantalla), y el intervalo entre dos franjas oscuras consecutivas. Por ejemplo: si $D = 1{,}5$ m; $d = 0{,}9$ mm; $I = 1$ mm; resulta:

$$\lambda = \frac{0{,}9\text{ mm} \cdot 1\text{ mm}}{1\,500\text{ mm}} = 0{,}000\,6\text{ mm} = 0{,}6\,\mu$$

(Luz amarilla)

Interferencia con luz blanca

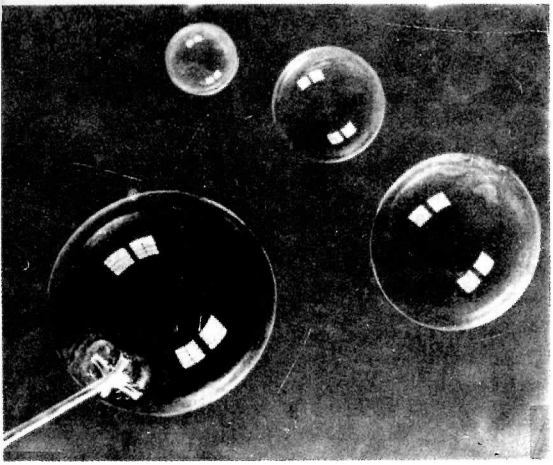
De la fórmula

$$i = \frac{\lambda\,D}{2\,d}$$

resulta que el intervalo entre las franjas es directamente proporcional a la longitud de onda. Quiere decir que, en igualdad de condiciones, las franjas son más anchas cuando se trabaja con luz roja ($\lambda = 0{,}7\,\mu$), por ejemplo, que con luz amarilla ($\lambda = 0{,}6\,\mu$), o azul ($\lambda = 0{,}5\,\mu$). Por esa razón, cuando se producen franjas de interferencia con luz blanca, los bordes aparecen coloreados, siendo de color rojo los bordes externos, y violeta los internos.

Interferencia en la casa y en la calle

Cuando se hacen pompas de jabón, casi siempre se las ve coloreadas. Esos colores son debidos a la



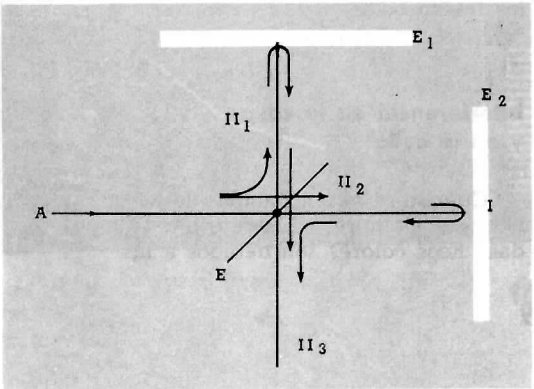
Pompas de jabón.

interferencia entre los rayos de luz que se reflejan en las superficies exterior e interior de la película jabonosa que forma la pompa.

En días lluviosos es frecuente ver en el pavimento manchas irisadas: las produce la capa de aceite desprendida de los automotores y que flota sobre el agua. Es sumamente delgada, y los rayos de luz que se reflejan en las superficies superior e inferior de esa película interfieren entre sí, anulando unos colores y reforzando otros.

Con dos vidrios bien pulidos es posible observar franjas de interferencia. Basta iluminar ambos con luz monocromática –luz de sodio, por ejemplo, obtenida quemando un poquito de sal de cocina– y hacer girar uno con respecto al otro hasta que aparezcan las franjas. El fenómeno se produce debido a la diferencia de camino recorrido por un rayo que se refleja en la superficie interior del primer vidrio y la de otro rayo que atraviesa el primer vidrio y se refleja sobre la cara superior del segundo vidrio luego de haber atravesado la capa de aire que separa a los dos; esta capa de aire produce la diferencia de marcha necesaria para la interferencia. Si se varía su espesor, varía el tamaño y la ubicación de las franjas.

Esquema del método de Michelson para producir interferencia.



El método de Michelson

Un rayo de luz A I incide con un ángulo de 45° sobre una lámina de vidrio E, ligeramente espejada, de modo que en parte se refleja ($I I_1$) y en parte se refracta ($I I_2$). Dos espejos, E_1 y E_2, devuelven esos rayos hacia E, donde vuelven a reflejarse y refractarse parcialmente, de modo que en $I I_3$ hay superpuestos dos rayos que interfieren entre sí.

El movimiento absoluto y el éter

El interferómetro de Michelson ha permitido realizar comprobaciones muy importantes: una de las más notables es que la luz se propaga en todas direcciones con

la misma velocidad. Esto provocó mucha sorpresa en su época (1887); en efecto: se admitía que la luz era un fenómeno ondulatorio, en el cual el medio puesto en vibración era *el éter*.

El éter era un ente ideal (perfectamente fluido, perfectamente elástico, e imponderable, es decir, sin peso), llenaba todo el universo y permanecía en reposo absoluto.

Si en él producimos una perturbación (luz), esa perturbación se propaga en todos sentidos. Si el experimentador está en reposo con respecto al éter (lo que significaría *reposo absoluto*), la luz se propaga en todos sentidos con igual velocidad (con respecto a nosotros).

Si el experimentador está en movimiento con respecto al éter, en una determinada dirección, con una velocidad v, y si la velocidad de la luz "en el éter" es c, la velocidad de la luz con respecto a nosotros en nuestra misma dirección será $c - v$ (si el rayo se aleja), o $c + v$ (si se acerca), o simplemente c si el rayo se propaga perpendicularmente a nuestra dirección.

Obsérvese que si se encuentra una diferencia en la velocidad de la luz, según su dirección con respecto a nuestro movimiento, se habrá comprobado la existencia de un movimiento respecto del éter, es decir, de un *movimiento absoluto*.

Michelson y Morley prepararon el *interferómetro*, para medir la variación de la velocidad de la luz con respecto a la Tierra, colocándolo de modo que el rayo $I I_2$ tuviera la dirección del movimiento de la Tierra, y el $I I_1$ transversal a la misma. Realizada la experiencia, no encontraron diferencia alguna. *La luz se propaga en todas direcciones y sentidos con igual velocidad.*

El resultado negativo de la experiencia de Michelson y Morley tuvo su explicación en la Teoría de la Relatividad, expuesta por Alberto Einstein (1905), una de cuyas consecuencias es que no se puede comprobar la existencia de un movimiento absoluto, porque el *concepto mismo de movimiento absoluto carece de sentido.*

La teoría de la relatividad dice que la sencilla fórmula

$$c' = c - v,$$

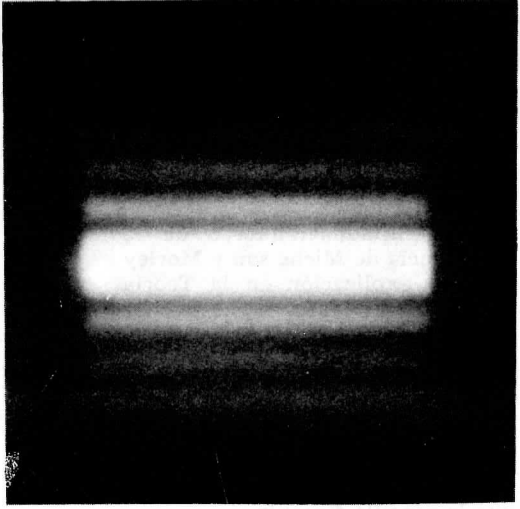
que debería darnos la velocidad de la luz c' respecto de nosotros cuando nos movemos con velocidad v en seguimiento del rayo de luz que escapa con velocidad c, no es correcta pues, respecto de nosotros, estemos en reposo o en movimiento, la luz siempre tendrá la misma velocidad c, como lo prueba la experiencia de Michelson y Morley.*

El fenómeno de difracción (luz en la sombra)

Delante de un foco luminoso intenso coloquemos una tarjeta con una ranura de aproximadamente 0,5 mm de ancho y 3 cm de largo. En otra tarjeta hagamos otra ranura, más delgada, y mirando a través de ésta, en forma semejante a la indicada para la experiencia de la pág. 147, observemos aquélla. Veremos no una

---

* Ver Introducción a la Física, tomo I, pág. 201



Toma fotográfica, en tamaño natural, de difracción en una ranura.

ranura, sino muchas imágenes de ella a cada lado de una central más luminosa, cuyos anchos y luminosidades van decreciendo a medida que se alejan de la central.

De acuerdo con el principio de Huygens,* cada punto de la ranura se transforma en un centro emisor de luz. Pero en ese caso no deberían aparecer las franjas que se observan, sino una ancha banda luminosa. Expliquemos esto mismo de otra manera: si la ranura se transforma en un foco de luz, colocando enfrente una pantalla (o una película fotográfica), *aparentemente*, debería observarse en ella una ancha banda de luz, y no franjas luminosas y oscuras alternativamente.

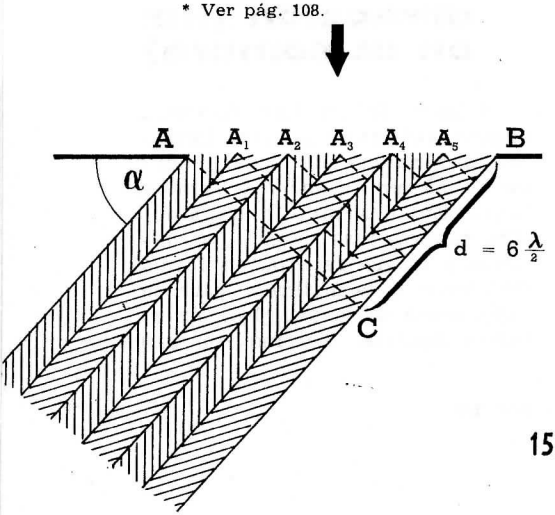
Veamos cuál es la explicación: sea A B el ancho de la ranura en la que supondremos que incide luz monocromática (figura al pie), y consideremos una dirección α tal que entre el rayo que parte de A y el que parte de B en esa dirección, haya una diferencia de caminos igual a un número par $(2\,k)$, de semilongitudes de onda (en el dibujo se ha representado $B\,C = 6\,\frac{\lambda}{2}$).

Consideremos la ranura dividida en $2\,k$ partes (en el dibujo, en 6 partes) por $2\,k - 1$ puntos (en el dibujo, 5 puntos), A_1, A_2, A_3, ... Obsérvese que entre los rayos que parten de los puntos comprendidos entre A y A_1 y los comprendidos entre A_1 y A_2 hay una diferencia de camino igual a $\frac{\lambda}{2}$, de modo que al interferir, se anulan. Lo mismo sucede con los rayos que parten de los puntos comprendidos entre A_2 y A_3, con los de A_3 y A_4, y entre A_4 y A_5 con los de A_5 y B.

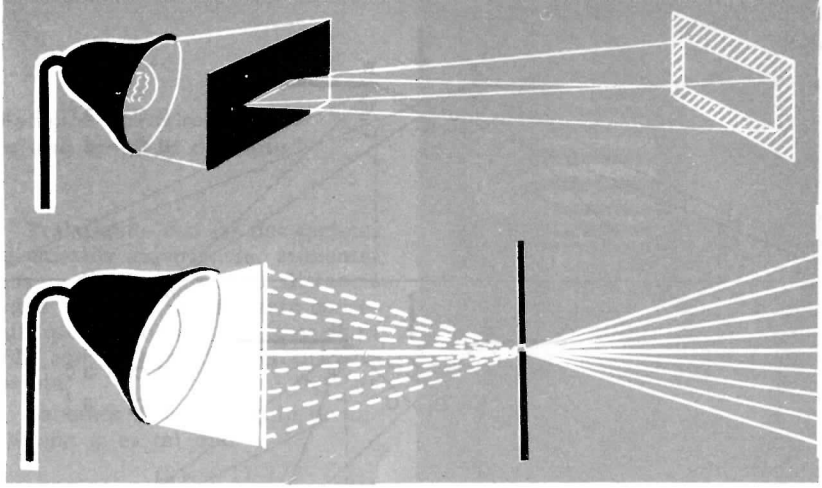
Como resultado, si nos ubicamos en la dirección α no percibiremos luz.

Por el contrario, si elegimos una dirección φ tal que la diferencia de camino entre los rayos que parten de A y de B en esa dirección sea un número impar de semilongitudes de onda $(2\,k + 1)\,\frac{\lambda}{2}$, y dividimos la ranura por medio

* Ver pág. 108.



En esa dirección, los rayos se anulan todos unos a otros.



Arriba): Lo que debería verse, si la luz no se difractara. Abajo): El haz de luz que incide sobre la segunda ranura se difracta, y de la ranura salen rayos en todas direcciones.

de 2 k puntos (en la figura del pie, la diferencia de caminos es $5\,\frac{\lambda}{2}$, y son 4 los puntos de división) se obtiene un número impar de haces de rayos. Cada haz se anula con el adyacente, pero como hay un número impar de haces, hay uno que no se anula, y ése es el que da un máximo de iluminación, o, el que nos permite ver una imagen de la ranura cuando lo recibimos en nuestros ojos.

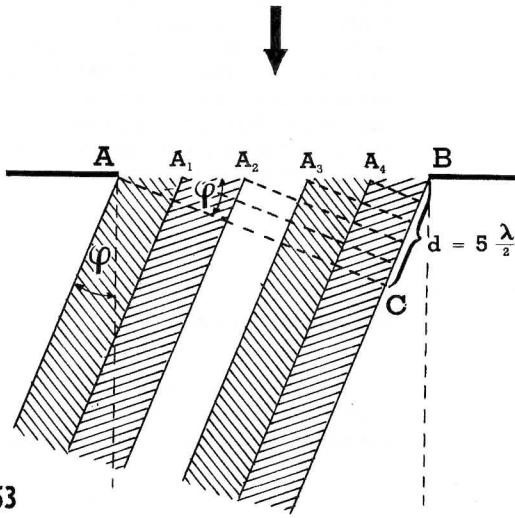
Esta experiencia enseña que la luz bordea los obstáculos: al atravesar la ranura, se dispersa lateralmente dando varias imágenes, pero como ésa es una característica esencial de los fenómenos ondulatorios, se concluye que la *luz es un fenómeno ondulatorio.* Si los efectos de difracción luminosos son menos observables cotidianamente que los de difracción sonora, ello se debe a la pequeña longitud de onda de la luz, por lo que se requieren obstáculos muy pequeños para que se produzca la difracción.

Influencia del ancho de la ranura

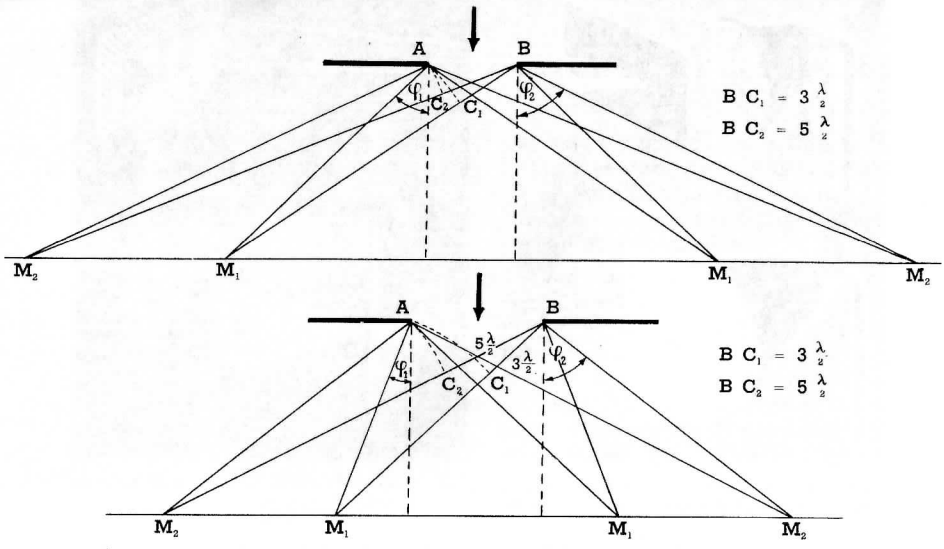
Del dibujo resulta que, siendo d la diferencia de camino entre los rayos de los bordes,

$$\text{sen } \varphi = \frac{d}{\text{A B}}$$

φ, ángulo de difracción.



En esa dirección, los rayos no se anulan todos.



Cuanto más angosta es la ranura, más separadas están las franjas de difracción.

De esta fórmula se deduce que cuanto mayor sea A B, menor será sen φ y más apretados estarán los máximos y mínimos, por lo que si la ranura llega a ser demasiado ancha el fenómeno deja de percibirse. Se comprende entonces la importancia de que el ancho de la ranura sea el menor posible. Pero inmediatamente surge otro inconveniente: cuanto más delgada sea la ranura, menor es la cantidad de luz que la atraviesa, resultando más dificultosa la observación del fenómeno. Por lo tanto, es necesario llegar a una solución de compromiso entre ambos inconvenientes.

Influencia del color

Como hemos visto, si la diferencia de caminos entre los rayos extremos es igual a un número impar de semilongitudes de onda se produce una franja brillante. Es decir, para

$$d = (2\,k + 1)\,\frac{\lambda}{2}$$

o sea, reemplazando en la fórmula anterior

$$\text{sen}\,\varphi = \frac{(2\,k + 1)\cdot \lambda/2}{\text{A B}}$$

que enseña que la ubicación de las franjas brillantes, dada por el ángulo φ, depende de la longitud de onda de la luz empleada. Por lo tanto, si realizamos la experiencia con luz roja, y después con luz violeta, como $\lambda_r \neq \lambda_r$, el primer máximo para el rojo se hallará formando un ángulo φ_r, distinto del φ_r; y como $\lambda_r > \lambda_r$, resulta $\varphi_r > \varphi_r$. Es decir que trabajando con la misma ranura, las franjas rojas están más alejadas de la franja central que las franjas violetas.

Medición aproximada de una longitud de onda*

Trabajando con las dos tarjetas de nuestra experiencia, aumentemos o disminuyamos la distancia entre ambas tarjetas, hasta conseguir que uno de los espectros coincida con el borde de la primera tarjeta.

Sabemos que el ángulo de difracción φ es tal que

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{(2k+1)\cdot\lambda/2}{AB} \qquad (1)$$

Por otra parte, si llamamos a a la distancia entre el borde de la tarjeta y la ranura, y d a la distancia que separa las tarjetas, se tiene

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a}{d} \qquad (2)$$

Como φ es muy pequeño, aproximadamente es:

$$\operatorname{sen}\varphi = \operatorname{tg}\varphi \qquad (3)$$

De (1), (2) y (3):

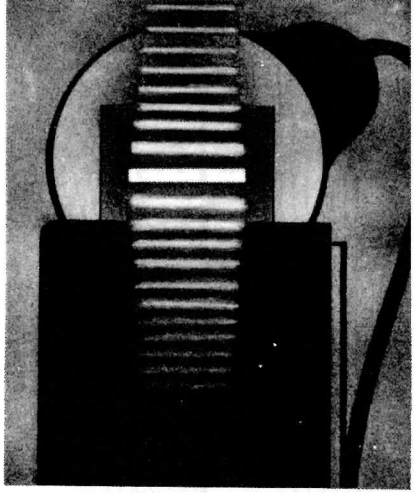
$$\frac{(2k+1)\cdot\lambda/2}{AB} = \frac{a}{d} \quad \therefore$$

$$\therefore\ \lambda = \frac{2a\cdot AB}{d\cdot(2k+1)}$$

Si, por ejemplo, hemos hecho que el espectro de 3er. orden ($k=2$) sea el que coincida con el borde:

$$\lambda = \frac{2a\cdot AB}{d\cdot 5} = \frac{2}{5}\cdot\frac{a\cdot AB}{d}$$

EJEMPLO: *Realizada la experiencia por nosotros, obtuvimos: $a = 2$ cm; $AB = 0{,}1$ mm; $d = 1{,}6$ m.*



Cómo deben verse las franjas, para poder medir la longitud. Obsérvese que una de las franjas luminosas se forma sobre el borde de la primera tarjeta.

Con lo que

$$\lambda = \frac{2}{5}\cdot\frac{2\text{ cm}\cdot 0{,}1\text{ mm}}{160\text{ cm}} =$$

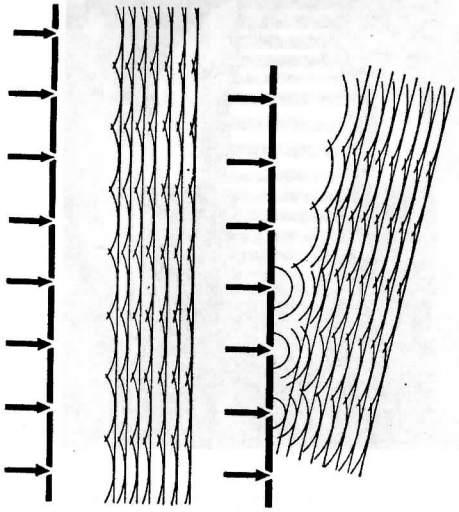
$$= 0{,}0005\text{ mm} = 0{,}5\ \mu = 5\,000\ \text{Å}$$

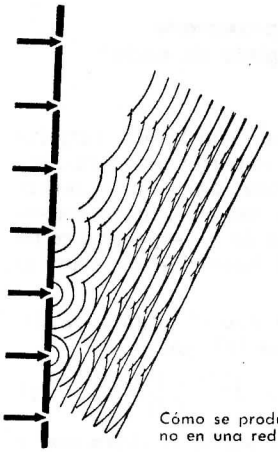
Naturalmente que como se trabajó con luz blanca, la longitud de onda obtenida es un término medio de las longitudes de onda que forman la luz blanca.

Las redes de difracción

Para que el espectro de difracción dado por una ranura sea suficientemente ancho, o, si se produce un espectro de líneas, para que las líneas estén suficientemente separadas unas de otras, el ancho de la ranura debe ser muy pequeño, y cuanto más pequeño sea, mayor será la separación. Pe-

* Experiencia tomada de *Enseñanza de la Física*, de E. Loedel.





Cómo se produce el fenómeno en una red de difracción.

ro si se extrema la pequeñez del ancho se produce un inconveniente: la cantidad de luz que atraviesa la ranura es excesivamente pequeña, y el espectro resulta prácticamente inobservable. Este inconveniente se salva con las redes de difracción: en lugar de una sola ranura se hace un gran número de ellas, muy juntas, separadas unas de otras por una distancia aproximadamente igual al ancho de la ranura, con lo cual se consigue un espectro suficientemente luminoso. El número de líneas es variable de una a otra red, pudiendo alcanzar hasta cerca de 5 000 por milímetro. Si se usa la red para observar por transparencia, las líneas hacen las veces de diafragmas opacos y los espacios intermedios, de ranuras transparentes. En cambio, en la observación por reflexión, las primeras aparecen como diafragmas negros, y los segundos, como líneas brillantes. Ya hemos visto en la página 139 que las redes de difracción son un poderoso auxiliar de la espectroscopia.

Obsérvese así un disco fonográfico.

UNA RED SINGULAR. Tome un disco fonográfico y obsérvelo a la luz de una lámpara, como indica la figura. Los surcos del disco hacen el efecto de una red de difracción por reflexión, y se observan los hermosos colores de los espectros de difracción.

11 LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ

La imagen "fantasma"*

Con dos vidrios cualesquiera, de dos cuadritos, por ejemplo, se puede realizar una experiencia muy curiosa. Si bien es sencilla, requiere cierto cuidado en la medición de los ángulos.

Tome una hoja de papel y trace en ella una semirrecta, con origen en uno de los vértices, que forme con el borde de la hoja un ángulo de 33°. Doble y corte el papel por esa semirrecta; obtiene así un triángulo rectángulo, cuyos ángulos miden 33° y 57°.

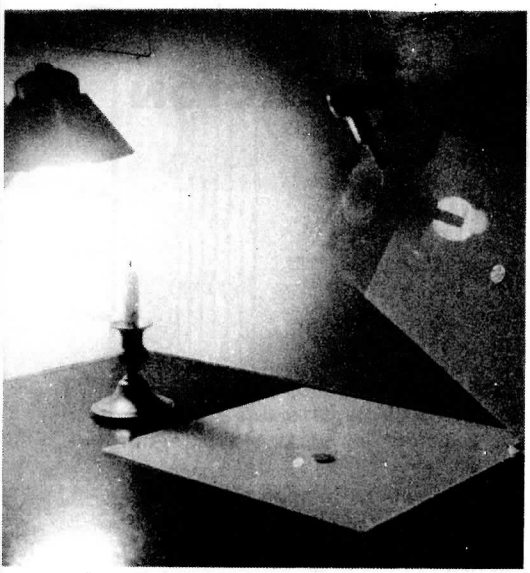
Coloque sobre la mesa una lamparita eléctrica encendida. Tome el triángulo de papel y, apoyando en la mesa su cateto mayor, ubíquelo de modo que la prolongación de su hipotenusa pase por la lamparita.

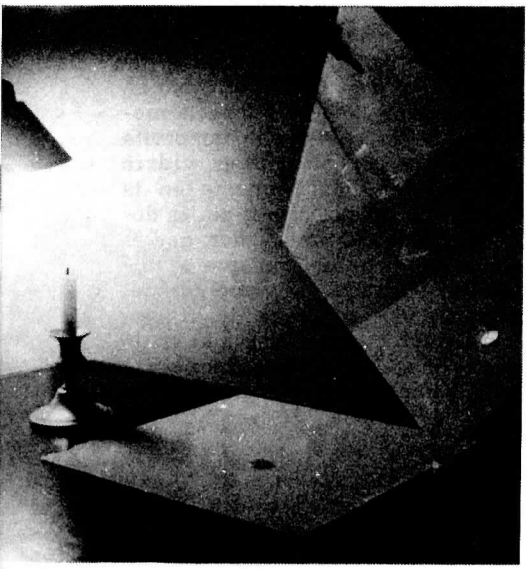
Coloque uno de los vidrios sobre la mesa, de modo que su parte central coincida con el vértice del ángulo de 33°. Marque sobre el vidrio (por ejemplo, colocando un pedacito de papel o una moneda) la posición del vértice del ángulo de 33°.

Observe la imagen de la lámpara producida por el vidrio, y ubíquese de modo que la imagen se vea bajo la moneda que sirve de marca. Los rayos que usted recibe en su ojo han incidido en el vidrio con un ángulo de 57°.

Ahora tome el segundo vidrio y colóquelo casi verticalmente, de modo que, mirando en él como en un espejo, se vea (cerca de la moneda) la imagen de la lamparita producida por el primer vidrio (obsérvese cuidadosamente en la fotografía las posiciones de los dos vidrios y la del observador, que es la de la máquina con que se tomó la fotografía). Hágase girar el segundo vidrio lentamente, al mismo tiempo que se observa el brillo de la imagen que él produce hasta que la imagen de la lámpara se vea bajo la moneda. Se verá que el

* Esta experiencia nos fue sugerida por una análoga descripta en *Enseñanza de la Física*, de Enrique Loedel.





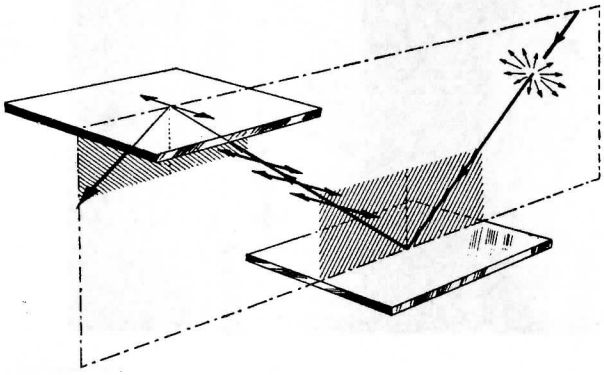
Arriba): Los rayos que salen de la lamparita se reflejan en el vidrio horizontal y luego en el segundo, y llegan –por eso se ve la imagen de la lamparita– al objetivo de la máquina fotográfica, que hace el papel del ojo de un observador. Abajo): Los mismos rayos son recibidos por el segundo vidrio, de modo tal que el plano de incidencia en el primer vidrio y el de incidencia en el segundo sean perpendiculares entre sí. Siendo así, los rayos inciden en el primer vidrio y se reflejan; inciden en el segundo . . . ¡y no se reflejan! Por eso **no se ve** la imagen de la lamparita. Obsérvese que la imagen de la moneda se ve muy brillante, porque sí se reflejan en el segundo vidrio los rayos que previamente se reflejaron no en el primer vidrio sino en la moneda. Y rodeando esa imagen se alcanza a percibir con dificultad una tenue imagen de la lamparita.

brillo se va apagando poco a poco, hasta que llega una posición en que la imagen desaparece casi por completo, pese a que sobre el vidrio inciden rayos luminosos.

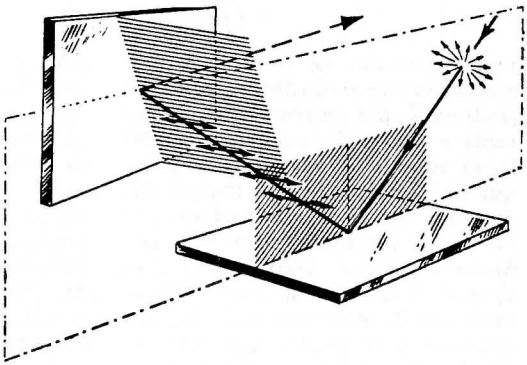
Observemos que el fenómeno ocurre cuando los planos de incidencia (recordemos que el plano de incidencia está determinado por el rayo incidente y la normal al espejo) son *perpendiculares* entre sí. En cambio, cuando los planos son *paralelos*, la segunda imagen tiene su máxima intensidad.

En resumen: la intensidad luminosa de la imagen producida en un vidrio, cuando sobre él inciden rayos luminosos reflejados primeramente en otro vidrio, es variable. Dicha intensidad es máxima cuando ambos planos de incidencia son paralelos entre sí; y mínima cuando los planos de incidencia son *perpendiculares*.

La experiencia anterior fracasa si se realiza con espejos comunes en lugar de vidrios. Los espejos comunes tienen generalmente mercurio como superficie espejan-



Cuando los planos de incidencia son paralelos, hay rayo reflejado.

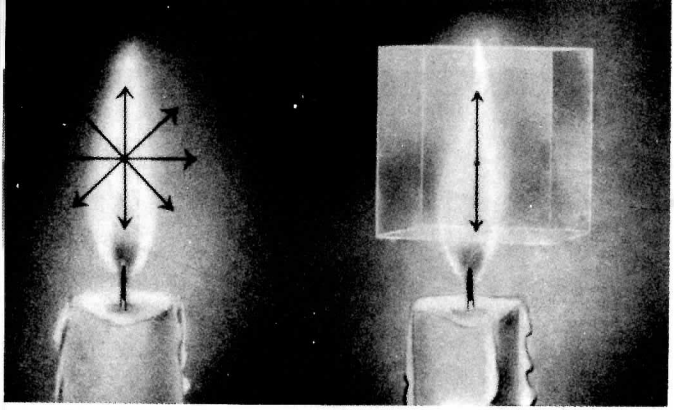


Cuando los planos de incidencia son perpendiculares, no hay rayo reflejado.

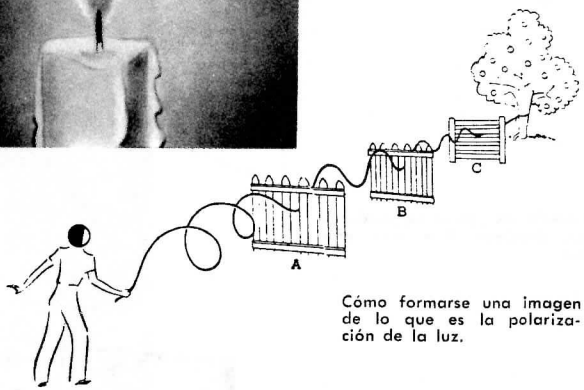
te; por razones que no corresponden a este texto, los metales impiden la producción del fenómeno. Deben usarse por lo tanto, espejos *no* metálicos. En las figuras de la página 158, la moneda se ve brillante porque es metálica.

¡Cómo son las vibraciones luminosas!

Hemos visto ya que la interferencia y la difracción revelan claramente el carácter ondulatorio de la luz. Pero queda todavía algo por aclarar: ¿cómo son las ondas? ¿transversales? ¿longitudinales?



Interpretación de los fenómenos de polarización según Fresnel.



Cómo formarse una imagen de lo que es la polarización de la luz.

Los fenómenos de interferencia y difracción no permiten resolver el problema, por cuanto ello ocurre tanto en las ondas sonoras, que son longitudinales, como en ondas líquidas que son transversales. En general, los físicos pensaban que las ondas luminosas eran longitudinales, aunque Young y Fresnel apoyaban la otra hipótesis. Precisamente, la experiencia de los vidrios es el fenómeno que permite decidir la cuestión en favor de las ondas transversales.

Para comprenderlo mejor, comparemos: una soga está sujeta por un extremo, y con una mano se agita el otro. La soga pasa a través de vallas que poseen barrotes horizontales y verticales, como indica la figura. Las ondas producidas no tienen inconveniente en pasar a través de las vallas A y B cuyos barrotes son verticales; en cambio no pasan a través de la valla C, cuyos barrotes son horizontales y por lo tanto perpendiculares a los de A y B. Se dice entonces que la vibración de la cuerda ha sido *polarizada* por la primera valla y, naturalmente, las otras vallas dejarán, o no, pasar estas vibraciones, según como estén dispuestos sus barrotes respecto de la dirección de la vibración polarizada. Habrá una posición de la segunda valla en que la vibración polarizada pasará perfectamente, y otra en la que no pasará; en posiciones intermedias, pasará parte de la vibración.

Fresnel pensó que esto es análogo a lo que ocurre con los dos vidrios. Admitió dos hipótesis:

1) En los rayos de luz natural, las vibraciones se realizan en todas las direcciones de un plano perpendicular a la dirección del rayo.

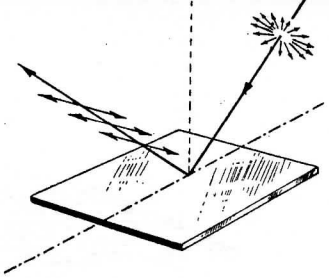
2) Cuando la luz natural se *refleja* sobre una superficie no metálica, se polariza.

Con esas hipótesis razonó así:

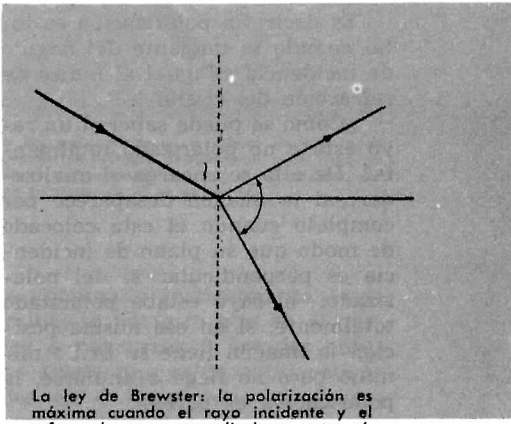
1) Cuando el rayo de luz incide en el primer vidrio, se *polariza* de tal manera que el rayo reflejado sólo contiene vibraciones que se efectúan perpendicularmente al plano de incidencia.

2) Si al llegar el rayo polarizado al segundo vidrio encuentra a éste dispuesto de tal manera que su plano de incidencia sea paralelo al del primer vidrio, la vibración puede continuar realizándose, y el rayo se reflejará sin dificultades. Pero si el plano de incidencia es perpendicular, la vibración se detendrá como ante un muro, y el rayo no podrá reflejarse. En las posiciones intermedias pasará una parte de la vibración.

El primer vidrio, causa del fenómeno, se llama *polarizador*. El segundo, que nos revela el fenómeno, se llama *analizador*. Sin el primero no podríamos polarizar la luz; sin el segundo, no podríamos saber si está o no polarizada, porque el ojo humano no distingue la diferencia entre luz natural y luz polarizada.



En el rayo incidente (luz natural o no polarizada), las vibraciones se cumplen en todas las direcciones perpendiculares al rayo. En el rayo reflejado sólo se cumplen las vibraciones paralelas al plano del espejo, o sea perpendiculares al plano de incidencia.



La ley de Brewster: la polarización es máxima cuando el rayo incidente y el refractado son perpendiculares entre sí.

Polarización total y polarización parcial

Ley de Brewster

El grado de polarización de un rayo reflejado varía con el ángulo de incidencia. En 1815, David Brewster descubrió que la polarización del rayo reflejado es máxima cuando el rayo reflejado es perpendicular al rayo refractado a través del cristal.

En la figura se advierte que en esas condiciones se verifica que

$$\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = n \qquad (1)$$

(segunda ley de la refracción)

Pero como el rayo reflejado y el rayo refractado son perpendiculares entre sí,

$$r = 90^\circ - i$$

y por lo tanto,

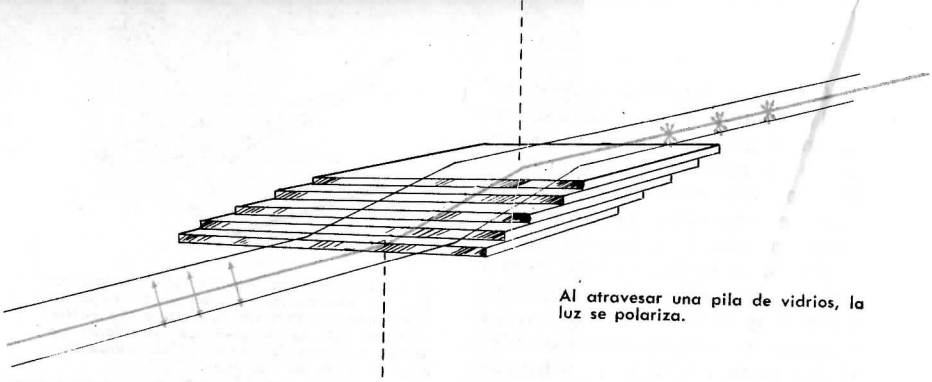
$$\operatorname{sen} r = \cos i;$$

de modo que reemplazando en (1)

$$\frac{\operatorname{sen} i}{\cos i} = n$$

y como $\dfrac{\operatorname{sen} i}{\cos i} = \operatorname{tg} i$

resulta $\boxed{\operatorname{tg} i = n}$



Al atravesar una pila de vidrios, la luz se polariza.

Es decir: la polarización es total cuando la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción del cristal.

¿Cómo se puede saber si un rayo está o no polarizado totalmente? De ello se encarga el analizador: si la imagen desaparece por completo cuando él está colocado de modo que su plano de incidencia es perpendicular al del polarizador, el rayo estaba polarizado totalmente; si en esa misma posición la imagen tiene su brillo mínimo pero no llega a anularse, la polarización es parcial.

EJEMPLO: *El índice de refracción del agua es $n = 1{,}33$; el ángulo cuya tangente vale 1,33 es 53° (aproximadamente); de modo que cuando un rayo de luz incide sobre la superficie del agua con un ángulo de 53°, la polarización del rayo reflejado es total.*

El índice de refracción del vidrio es 1,5 (aproximadamente, pues varía de una clase de vidrio a otra); el ángulo cuya tangente vale 1,5 está comprendido entre 56° y 57°. Por lo tanto, el ángulo para el cual se produce la polarización total en el vidrio es de unos 57°. Se comprenderá ahora por qué insistíamos en medir correctamente los ángulos en la experiencia con los vidrios: queríamos obtener la polarización cercana a la total.

La luz también se polariza al refractarse

Nuestro analizador es un hábil "detective", pues con sólo hacerlo girar, nos permite saber si un rayo de luz está o no polarizado. Gracias a él es fácil descubrir que la luz natural no sólo se polariza al reflejarse, sino también al refractarse. Para observar mejor el fenómeno, conviene que el rayo atraviese no un solo vidrio, sino unos quince vidrios apilados. Se comprobará no sólo que el rayo refractado está polarizado, sino también que lo ha hecho en forma contraria a la reflexión, pues el analizador da una intensidad mínima de la imagen cuando su plano de incidencia es paralelo al plano de refracción. Esto significa que, en la refracción, el rayo emergente sale vibrando en el plano de refracción, mientras que en la reflexión sale vibrando en un plano perpendicular al de incidencia.

Los cristales que hacen ver doble

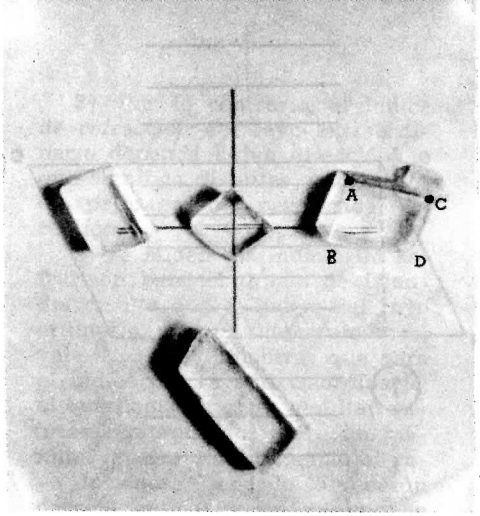
En 1669, un médico danés, Erasmus Bartholinus, publicó sus observaciones sobre un cristal que le había llegado de Islandia, el que le había sorprendido sobremanera, pues al observar los objetos a través del mismo no veía una sola imagen, como ocurre con los cristales comunes, sino *dos*. Llamó a este fenómeno *doble refracción de la luz* o *birrefringencia*, pues es evidente que a cada rayo incidente corresponden dos rayos refractados.

Observó, además, que haciendo girar el cristal llamado espato de Islandia, una de las imágenes permanecía inmóvil, mientras que la otra giraba alrededor de la fija. A los rayos que forman la imagen fija los llamó *rayos ordinarios*, y a los otros, *rayos extraordinarios*.

En el cristal existe una dirección privilegiada llamada *eje óptico* en la que no se produce birrefringencia; mirando por el cristal según dicho eje, sólo se observa una imagen. (Obsérvese que en la fotografía, la línea vertical no es doble).

Además del espato de Islandia hay otros cristales birrefringentes: el cuarzo, la turmalina, el berilo, etc. Otros cristales son birrefringentes, pero tienen *dos ejes ópticos*; así ocurre con la turquesa y el topacio.

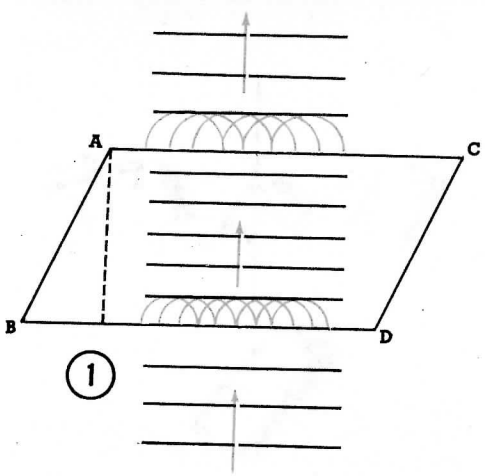
Como el espato de Islandia (o calcita) muestra muy marcadamente la birrefringencia, conviene conocer algunas características. Son los cristales de la fotografía, que ha sido tomada con la máquina apuntando verticalmente desde arriba; se advierte que en el vértice A concurren 3 ángulos obtusos (cada uno mide 102°), mientras en C concurren dos agudos (unos 78°) y uno obtuso. Obsérvese que en el cristal central se ve una doble imagen por encima del brazo horizontal, mientras que en el ABCD la segunda imagen está por debajo; pero en ambos casos la imagen extraordinaria está más alejada del vértice A (concurrencia de 3 obtusos) que la ordinaria.



La luz que atraviesa un cristal de espato de Islandia se refracta doblemente: a un rayo incidente corresponden dos rayos refractados; por eso a través de él se ve doble.

Eje óptico

En estos cristales hay una dirección muy importante: la que forma ángulos iguales con las tres aristas AB AC AD, a la cual hemos



El rayo ordinario.

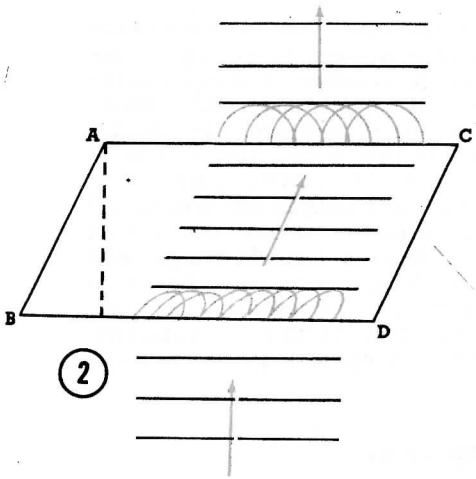
El rayo extraordinario.

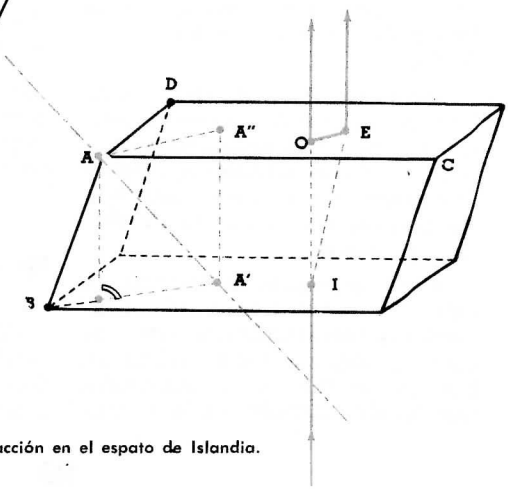
señalado con AA'. *Eje óptico* es cualquier recta paralela a AA'. Como se ve, el eje óptico *es una dirección*. La proyección de A' sobre el plano ADC es A".

Plano principal

Los rayos ordinario y extraordinario definen un plano, que contiene el eje óptico, llamado plano principal.

Supongamos que la luz viene de abajo e incide normalmente sobre la cara del cristal, en el punto I. El rayo ordinario sigue sin desviarse y atraviesa la cara superior por el punto O; el extraordinario se desvía e incide en E. Se verifica que la recta OE es paralela a AA". Si el rayo incide paralelamente al eje óptico, no se observa birrefringencia, es decir, se superponen los rayos ordinario y extraordinario.





Direcciones que interesan en la doble refracción en el espato de Islandia.

Velocidad de los rayos ordinario y extraordinario

De las observaciones sobre el espato de Islandia se deduce:

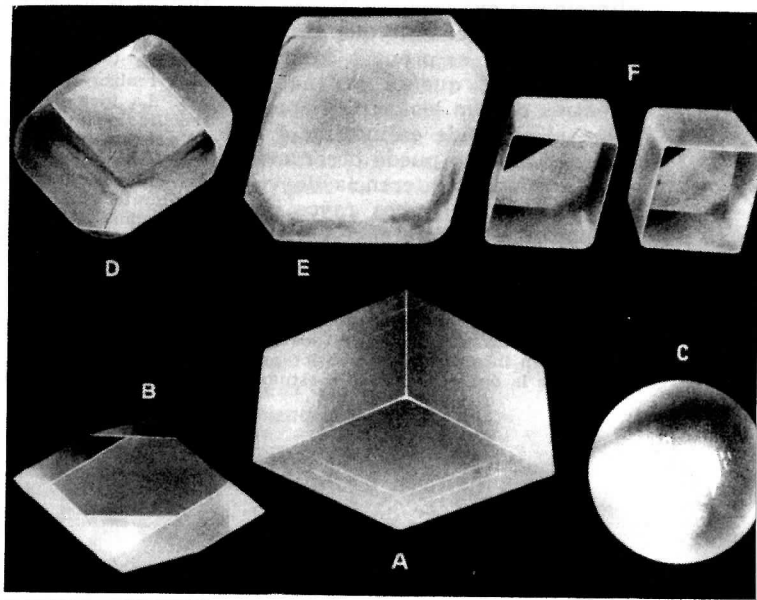
1) El cristal tiene un índice de refracción para el rayo ordinario y otro diferente para el extraordinario. Pero como sabemos que la velocidad de propagación de la luz en un medio es inversamente proporcional al índice de refracción del medio, la velocidad de propagación del rayo ordinario es diferente de la del rayo extraordinario.

2) Como la imagen dada por el rayo ordinario permanece fija al hacer girar el cristal, su índice de refracción es constante e independiente de la dirección de propagación. Por eso se lo llama ordinario, pues se comporta como un rayo refractado por un medio monorrefringente (por ejemplo, cuando un rayo de luz atraviesa agua o vidrio).

3) Por lo contrario, el índice de refracción del rayo extraordinario depende de su dirección, lo que significa distintas velocidades de propagación para cada dirección.

Si se miden los índices de refracción para el espato de Islandia resulta que el índice del rayo ordinario, al que llamaremos n_o, vale $n_o = 1{,}658$, mientras que para el índice del rayo extraordinario, al que llamaremos n_e, resultan valores comprendidos entre un máximo igual a 1,658 (cuando el rayo incidente tiene la dirección del eje óptico) y un mínimo de 1,486 cuando el rayo incidente es perpendicular al eje óptico. Por lo tanto, con la velocidad ocurre a la inversa: el rayo extraordinario tiene mayor velocidad que el ordinario, salvo en la dirección del eje óptico, en que son iguales.

En el cuarzo, en cambio, las cosas ocurren a la inversa: $n_o = 1{,}544$, mientras que n_e tiene valores comprendidos entre 1,544 y 1,553, correspondiendo nuevamente este valor a una dirección perpendicular al eje óptico.



Colección de espatos del laboratorio de física de la Facultad de Ciencias de Poitiers.

Los cristales de la clase del espato de Islandia, en los que la velocidad del rayo extraordinario es mayor que la del ordinario, se llaman *negativos*, los del tipo del cuarzo se llaman *positivos*.

4) Como en la dirección del eje óptico no hay birrefringencia, en esa dirección ambos rayos se propagan con igual velocidad.

¿POR QUÉ SE VEN DOS RAYOS? Para explicar la birrefringencia, Huygens supuso que el rayo ordinario se propaga como en la refracción ordinaria; le corresponde, por lo tanto, una onda esférica; en cambio, al rayo extraordinario le debe corresponder una superficie alargada en la dirección de la velocidad máxima, y aplastada en la de la velocidad mínima. Esa onda resulta ser un elipsoide. Las superficies de ambas ondas son tangentes en dos puntos, lo cual significa que los rayos ordinario y extraordinario correspondientes a la dirección determinada por esos puntos marchan con igual velocidad; por lo tanto, esos puntos determinan la dirección del eje óptico. En los cristales negativos, el elipsoide es exterior a la esfera, lo que indica claramente que el rayo extraordinario se propaga con mayor velocidad que el ordinario, mientras que en los cristales positivos, el elipsoide es inferior a la esfera. También puede observarse que la máxima diferencia de velocidades entre ambos rayos corresponde a la dirección perpendicular al eje óptico.

CÓMO SE DESCUBRIÓ LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ. En 1808, un joven oficial del ejército napoleónico, Esteban Luis Malus, a quien interesaban mucho los problemas de la óptica, comenzó a estudiar la doble refracción. Mientras estaba en su habitación en París, experimentaba con un cristal de espato de Islandia; en un momento de descanso tomó el cristal y miró distraídamente a través del mismo, observando las imágenes dobles de todos los objetos que le rodeaban. Pero de pronto quedó perplejo: al mirar hacia una de las ventanas del Palacio de Luxemburgo, en cuyos cristales se reflejaba el sol, sólo aparecía una imagen, solamente una, y no las dos que debían esperarse. Inmediatamente comenzó a experimentar, observando a través del cristal de espato la luz reflejada en cristales o en el agua. Haciendo girar el espato advirtió que en ciertas posiciones percibía las dos imágenes, en otras, sólo la ordinaria, y en otras únicamente la extraordinaria, y que al pasar de una a otra, la luminosidad de una de las imágenes aumentaba, mientras que simultáneamente disminuía la de la otra.

Así se descubrió la polarización de la luz. La luz se polarizaba al reflejarse en las ventanas del Palacio de Luxemburgo, y el cristal de espato de Islandia hacía de *analizador*.

Un polarizador y analizador muy cómodo

Para muchas experiencias y aplicaciones es importante disponer de algún aparato que produzca luz polarizada más cómodamente que un vidrio, y otro aparato, igualmente cómodo, como analizador. El prisma llamado *nicol*, en honor de su inventor, un físico escocés llamado W. Nicol, quien lo diseñó en 1828, realiza eficazmente ambas funciones. La idea de su creación fue muy sencilla: como los rayos refractados en un cristal birrefringente están polarizados, basta encontrar la forma de eliminar uno de ellos para utilizar el cristal resultante como polarizador o como analizador. Nicol lo realizó de la siguiente manera: los cristales naturales de espato de Islandia son romboedros, de modo que la sección A B C D es un cuadrilátero cuyos ángulos agudos miden 71°. Se comienza por tallar las dos caras extremas, hasta reducir esos ángulos a 68°; luego se corta el prisma por un plano perpendicular a una de las

caras y a la sección principal. Por último se pegan los dos pedazos con bálsamo del Canadá, sustancia transparente, cuyo índice de refracción para el ordinario vale 1,549 (recuérdese que el n_o del espato es 1,658).

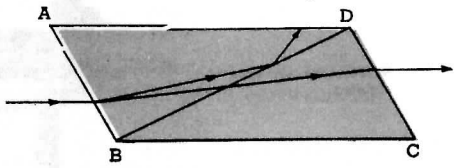
En estas condiciones, sólo emerge del prisma el rayo extraordinario. El ordinario ha sido eliminado de la siguiente manera: al llegar a la superficie del bálsamo, el rayo ordinario encuentra un medio menos refringente que el espato, y como el ángulo de incidencia en él es mayor que el ángulo límite, se produce la reflexión total, por lo cual se desvía hacia arriba; para completar la desaparición del ordinario se ennegrece la cara superior, y de esa manera es absorbido.

Si la luz que ha atravesado un nicol (polarizador) se recibe sobre un segundo nicol (analizador), la intensidad del haz emergente de éste dependerá de la posición relativa de ambos planos de vibración. Si las secciones principales de ambos nicoles son paralelas (nicoles paralelos), toda la luz polarizada por el primero atraviesa al segundo; si son perpendiculares (nicoles cruzados), el analizador intercepta totalmente la luz.

Esto se aprovechó en la guerra para disimular señales luminosas. Delante del foco que envía la señal se coloca un nicol, que polariza la luz. El observador que debe recibir las señales mira a través de otro nicol fijo. Observará eclipses o destellos según la forma en que en el transmisor coloque su nicol. Como el ojo no distingue entre luz natural y luz polarizada, para todos los demás observadores que carecen de un nicol la intensidad de la luz del foco es constante.

El azúcar y la luz polarizada

Con dos nicoles y un tubo de ensayo lleno de una solución de azúcar en agua puede realizarse una experiencia interesante, y de mucha utilidad en la práctica. Se colocan los dos nicoles de modo que los atraviese un mismo haz de luz. Un rayo de luz que atraviese el primero se polarizará



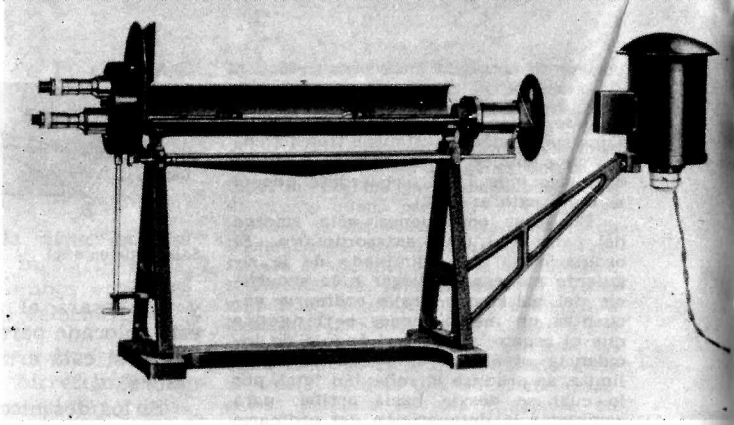
Sección de un nicol.

y atravesará el segundo nicol, si está colocado paralelamente al primero; si está cruzado, *no lo atravesará.*

Si los dos nicoles están paralelos veremos a través del segundo, claramente iluminado el primero. Girando lentamente aquél veremos que gradualmente la luz se va extinguiendo, hasta que la iluminación desaparecerá al quedar cruzados.

Ahora intercalemos el tubo de ensayo con la solución de azúcar en el camino del rayo de luz, entre los dos nicoles, y de modo que el rayo atraviese la solución a lo largo del tubo. Comprobaremos que a pesar de que los nicoles siguen cruzados, ha reaparecido el haz de luz que, aunque no en su totalidad, ahora atraviesa el segundo nicol. ¿Qué acontece al intercalar el tubo con la solución azucarada? La luz emerge del primer nicol vibrando en el plano de su sección principal; y por eso al incidir sobre un nicol cruzado no puede atravesarlo. Si, a pesar de los nicoles cruzados, atraviesa al segundo cuando se intercala la solución, no se puede menos que admitir que ésta tiene la propiedad de hacer girar el plano en que se producen las vibraciones luminosas.

Una solución azucarada hace girar el plano en que vibran las ondas luminosas de un haz polarizado.



Modelo de un sacarímetro.

Para saber cuánto ha girado el plano de vibración se hace girar el segundo nicol hasta que se produzca nuevamente la extinción del haz: el ángulo descripto es igual al ángulo girado por el plano de polarización.

Las sustancias que tienen la propiedad de producir una rotación en el plano de vibración de un haz polarizado se llaman *ópticamente activas*. Si la rotación del plano se produce en el sentido de las agujas del reloj (mirando desde el analizador), se las llama *dextrógiras*; en el caso contrario, *levógiras*.

El ángulo girado depende del color de la luz empleada, y crece del rojo al violeta, es decir: a mayor frecuencia, mayor rotación.

Además, para luz de una misma frecuencia la desviación depende de la sustancia disuelta, de la concentración y de la longitud de líquido atravesado por la luz. Experimentalmente se comprueba que *la desviación es directamente proporcional a la concentración y a la longitud de solución*. En símbolos:

$$\alpha = k\, c\, l:$$

k es una constante llamada *poder rotatorio específico* de la sustancia empleada, cuyo significado se deduce despejándola de la fórmula anterior:

$$k = \frac{\alpha}{c\, l}$$

Como se ve, k representa el ángulo girado por el plano de vibración, cuando la concentración es igual a la unidad, y la longitud de la solución es también la unidad.

Éste es el fundamento de los *sacarímetros*, aparatos que permiten calcular la concentración de una solución de sustancia ópticamente activa, midiendo la rotación del plano de polarización y la longitud del tubo lleno de solución.

Su aplicación más difundida es: se sabe que el poder rotatorio específico del azúcar puro, para la luz amarilla del sodio es

$$k = 0{,}0066\, \frac{\text{grados}}{g/l \cdot \text{cm}},$$

lo que significa que si el haz de luz polarizada atraviesa un tubo de 1 cm de largo con una solución de 1 g de azúcar en 1 litro de agua, el plano de vibración gira un ángulo de 0,0066°.

Por lo tanto, si disolvemos 150 g de azúcar puro en 1 litro de agua, y con esa solución llenamos un tu-

bo de 20 cm de largo, al atravesarlo el plano de vibración rotará un ángulo

$$\alpha = 0{,}0066 \frac{\text{grados}}{\frac{g}{l} \cdot \text{cm}} \cdot 150 \frac{g}{l} \times$$

$$\times 20 \text{ cm} \cong 20^\circ$$

Si disolvemos 150 g de azúcar bruto y la solución sólo produce una rotación de 15°, la riqueza en azúcar de esa muestra será del 75 %. En efecto:

$$c = \frac{\alpha}{k\,l} =$$

$$= \frac{15^\circ}{0{,}0066 \frac{\text{grados}}{\text{cm} \cdot g/l} \cdot 20 \text{ cm}} =$$

$$= 115 \frac{g}{l}$$

Luego

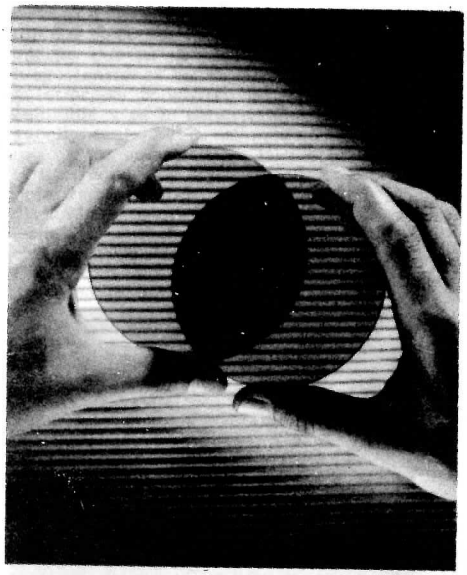
$$\frac{115}{150} \cong 0{,}75$$

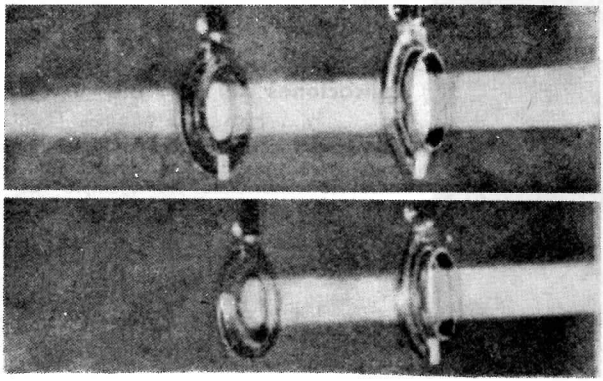
El polaroid

Actualmente se dispone de un medio mucho más barato y cómodo que los nicoles para obtener y analizar luz polarizada. Se trata del *polaroid*, ya muy difundido en muchas aplicaciones prácticas, particularmente en la construcción de anteojos para sol.

Su historia es la siguiente: en 1852 el médico inglés W. B. Herapath descubrió que los cristales sintéticos de yodosulfato de quinina –sustancia llamada desde entonces *herapatita*– tenían la propiedad de absorber completamente el rayo ordinario, por lo cual podían empleárselos en lugar de los

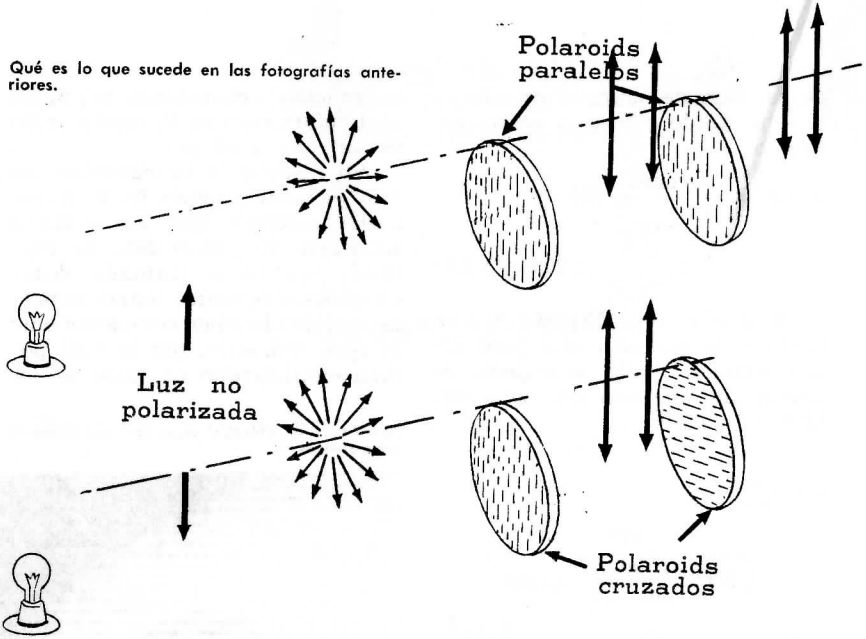
Dos discos de polaroid cruzados, parcialmente superpuestos.



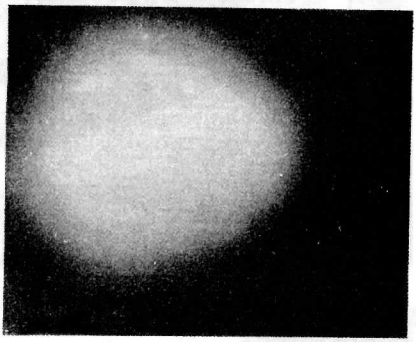


El haz de luz se polariza al atravesar el polarizador, pero no encuentra dificultad en atravesar el analizador cuando están paralelos. Al cruzar el analizador, en cambio, el haz no puede atravesarlo.

Qué es lo que sucede en las fotografías anteriores.



La fotografía de arriba fue tomada en el momento en que se cruzan los automóviles, sin emplear la luz polarizada. La de abajo, empleándola.



nicoles. Lamentablemente, la herapatita es tan frágil, que a veces con sólo tocarla se deshace en polvo. Este inconveniente hizo que se la dejara a un lado por mucho tiempo. Pero en 1927, un estudiante norteamericano de la Universidad de Harvard ideó "pintar" una hoja de material plástico con cristalitos pequeñísimos de herapatita –tan pequeños que caben 10^{11} en cada centímetro cuadrado–, y orientarlos luego de modo que todos los cristalitos apuntaran en la misma dirección. Así se obtuvieron las primeras hojas de *polaroid*.

Aplicaciones del polaroid

AUTOMOVILISMO NOCTURNO. Si los faros de los automóviles emitieran luz polarizada, recubriendo por ejemplo sus vidrios con polaroid, el automovilista

que de noche se cruza con aquél podría evitar ser encandilado si coloca en su parabrisas otra hoja de polaroid cruzada con respecto a las hojas que llevan los faros. Es inútil hacer resaltar las ventajas de ese dispositivo, que sin duda pronto se usará en todos los automóviles.

CINEMATOGRAFÍA EN RELIEVE. La sensación de relieve la logramos porque tenemos *dos* ojos. Cuando miramos un objeto, los ejes de los dos ojos forman entre sí un ángulo, que depende de la distancia a que se halla el objeto (mayor ángulo, cuanto menor es la distancia).

La cinematografía actual produce películas sonoras y en colores, pero que no dan la sensación de relieve. Puede conseguírsela con dispositivos en los que intervenga el polaroid. El procedimiento resultará sin duda costoso, pero la idea es muy interesante. En lugar de rodar una sola película, se ruedan dos, es decir, se utilizan dos máquinas filmadoras, que enfocan cada escena desde dos ángulos distintos, pero muy cercanos, tal como lo harían los ojos de un espectador que presenciara la escena. En la sala del cinematógrafo se proyectan simultáneamente sobre la pantalla las dos escenas, una de ellas con luz polarizada en un plano, y la otra en un plano perpendicular. Un espectador que observara la pantalla a ojo descubierto, vería dobles todas las imágenes. Pero con un par de anteojos provistos de polaroid, uno de ellos cruzado con respecto al otro, cada hoja de polaroid deja pasar una de las escenas y extingue la luz correspondiente a la otra. El espectador recibirá en cada ojo escenas tomadas desde ángulos distintos y tendrá la sensación de relieve.

FOTOELASTICIDAD. En Ingeniería se presenta muy a menudo el problema siguiente: averiguar cómo se distribuyen internamente las fuerzas y deformaciones de un cuerpo al que se lo comprime o tensiona de una manera determinada; por ejemplo, cómo se deforma internamente el gancho de un guinche cuando de él pende un peso; conociendo la distribución de las tensiones y deformaciones internas se puede saber cuál es la zona que "sufre" más y en dónde, eventualmente, puede producirse la rotura. El problema es muy complejo, pues son muy variables los cuerpos a analizar y las fuerzas que actúan. Una de las soluciones más rápidas y seguras se obtiene aplicando el llamado *método fotoelástico*, basado en el siguiente fenómeno: ciertas sustancias transparentes –el celuloide, la bakelita, etc.– son monorrefringentes en condiciones normales; pero si se las somete a tensiones se vuelven birrefringentes. Se procede entonces de la siguiente manera: se construye, en celuloide, bakelita, etc., un modelo del cuerpo que se estudia y se le aplican luego tensiones análogas; en el ejemplo anterior, se construye un "gancho" de celuloide y se lo carga análogamente al gancho real. Sobre el modelo se hace incidir luz polarizada, a la que luego se le hace atravesar un analizador. La luz polarizada que atraviesa el modelo se divide en dos componentes que vibran en las direcciones de las tensiones principales y que se transmiten solamente las componentes que vibran en el plano de polarización de éste, mientras que las otras son eliminadas. Colocando una placa fotográfica a continuación del analizador, se obtiene una fotografía compuesta de líneas brillantes y oscuras que indican las variaciones de refracción producidas por las tensiones aplicadas al modelo. Si se trabaja con luz blanca, la fotografía se obtiene en colores como consecuencia de la diferencia de velocidad de cada uno de los colores que la forman.

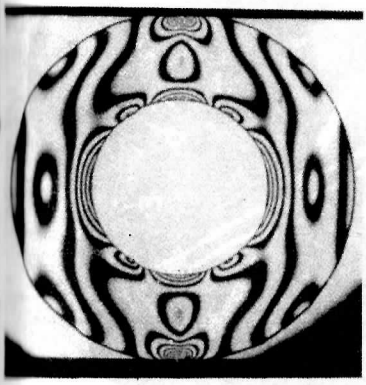
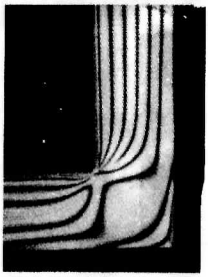


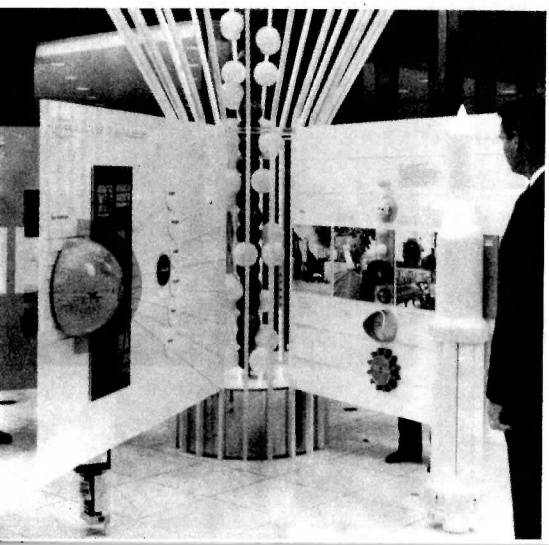
Diagrama de tensiones de un anillo comprimido diametralmente.



Fotografías de un gancho y una escuadra sometidos a tensiones.

IV

MAGNETISMO, ELECTRICIDAD Y MATERIA



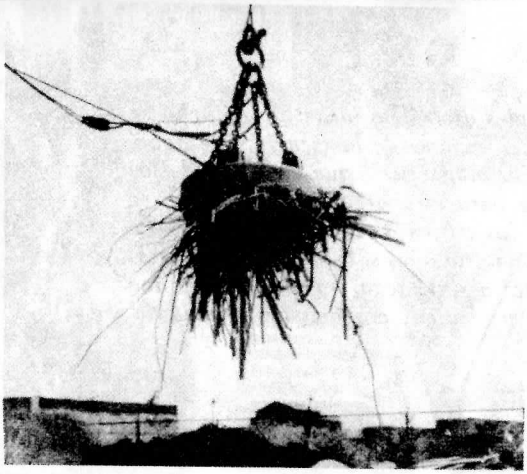
Desde Tales de Mileto hasta hoy, mucho se ha andado en el camino de la ciencia. De aquel "espíritu magnético" que emanaba de los cuerpos como una garra para atrapar los trozos de hierro cercanos; de los trozos de ámbar frotados para electrizarlos; de la materia, con sólo tres componentes: el agua, la tierra y el fuego, hoy llegamos a una síntesis entre electricidad, magnetismo y materia.

12 FENÓMENOS MAGNÉTICOS SENCILLOS

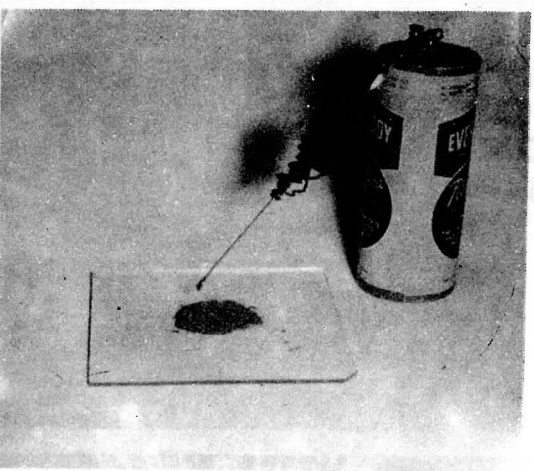
Imanes naturales y artificiales

Desde tiempos remotos se conoce la *piedra imán*, que posee la misteriosa cualidad de atraer trozos de hierro. Esto en la antigüedad –como a los niños de hoy– parecía cosa de magia, pues en general se cree que para mover un cuerpo hay que tocarlo de algún modo. Por eso suponían que esta piedra encerraba algún fluido o espíritu misterioso, que emanaba de ella como un brazo invisible para agarrar y atraer los trozos de hierro.

Esta curiosa piedra, llamada también *magnetita*, es un óxido de hierro, y abundaba en ciertas regiones del Asia Menor, norte de Grecia, Etiopía, y cerca de Troya,



Gigantesco electroimán trabajando como grúa en un puerto.



Cómo imanar una aguja de tejer con la corriente eléctrica de una pila.

la famosa ciudad homérica. Justamente el nombre de magnetita proviene de *Magnesia*, ciudad del antiguo reino de Lidia.

La magnetita es un *imán natural*. Si con un imán frotamos una barra de acero, siempre en el mismo sentido, la barra se transforma en un *imán artificial*. Mediante la corriente eléctrica, también se obtienen imanes artificiales; sobre la varilla que se quiere imanar –por ejemplo, una aguja de tejer–, se arrolla un cable, como indica la figura, y se lo conecta a los bornes de una pila. Al pasar la corriente, la barra se imana.

Los imanes artificiales tienen diversas formas, según el uso que se les desee dar; los más comunes son de forma de barra, de herradura, de aguja.

Una diferencia entre el hierro y el acero

Un hecho importante, que se puede comprobar al hacer imanes artificiales, es que el acero tarda en imanarse, pero mantiene el magnetismo adquirido, mientras que con el hierro sucede lo contrario.

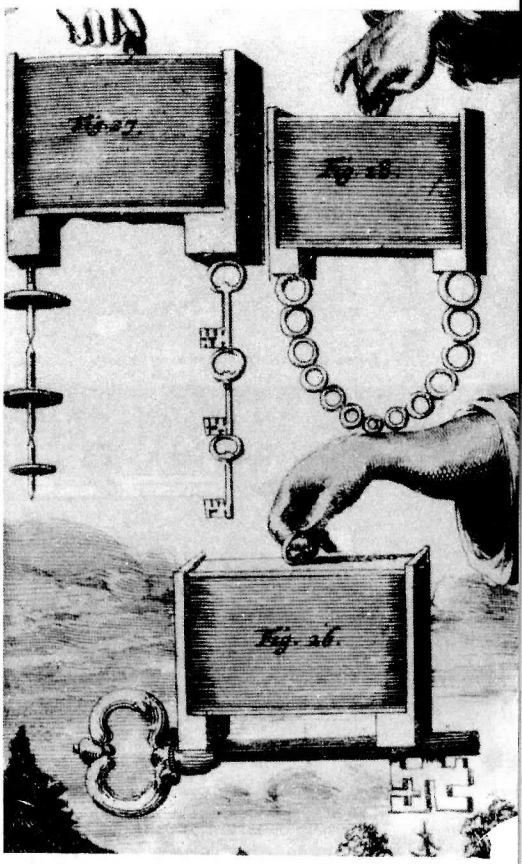
El acero se imana con dificultad, pero conserva el magnetismo. El hierro se imana y desimana con facilidad.

Hay una sustancia que se imana y desimana con extraordinaria facilidad: el *permalloy*, que es una aleación de hierro y níquel. Basta colocar una barrita de permalloy en la dirección norte-sur para que –por acción del magnetismo terrestre– se convierta en un imán; al sacarla de esa posición se desimana inmediatamente.

Desimanación a altas temperaturas

Suspéndase una barrita de níquel entre los polos de un imán y

se la verá orientarse en una dirección definida. Con un mechero, caliéntese fuertemente la barrita; se observará que en determinado momento cambia de orientación y el imán no tiene ya poder sobre ella: el níquel ha alcanzado una temperatura a la cual pierde sus propiedades magnéticas. Lo mismo sucede con el hierro, el cobalto, etc., pero cada uno a una temperatura propia. Pierre Curie descubrió este efecto, y por eso a esa temperatura se la llama *temperatura de Curie*. Para el hierro es de 750° C; para el níquel, 350° C; para el cobalto, 1 100° C.

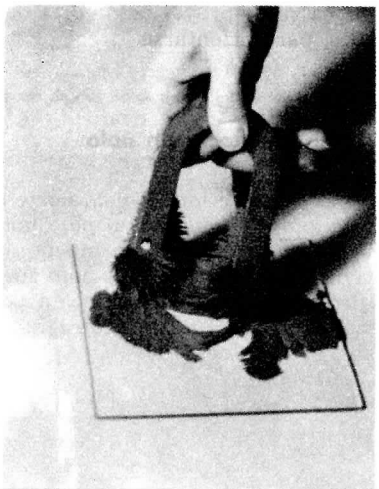


Imanes naturales armados, según Dalencé, en su **Traité de L'Aiman**, 1687.

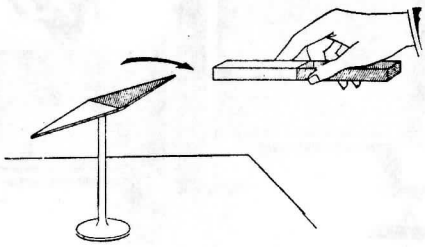
Polos de un imán

Si introducimos una barra imanada entre limaduras de hierro, al sacarla observamos que en los extremos hay prendidas más limaduras que en la parte central. En la zona media no ha quedado adherida ninguna. Esto evidencia que la fuerza de un imán es mayor en los extremos, y que en el medio no hay fuerza de atracción. Los extremos se llaman *polos* del imán, y la parte media, *zona neutra*.

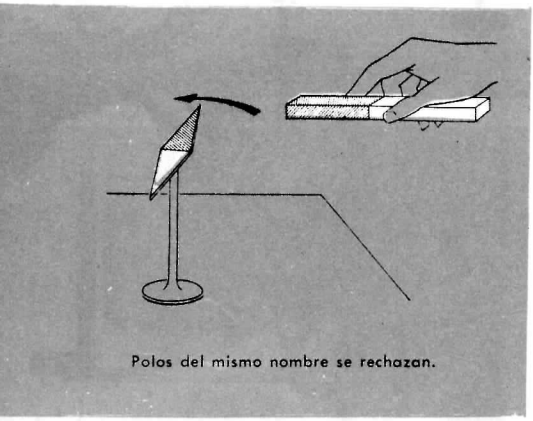
Si sobre una varilla vertical apoyamos una aguja magnética por su centro de gravedad, ésta oscila un momento y luego queda señalando aproximadamente la di-



Las limaduras indican dónde están los polos de un imán.



Polos de distinto nombre se atraen.



Polos del mismo nombre se rechazan.

rección norte-sur; al extremo de la aguja que señala el norte geográfico se lo llama *polo norte* del imán, y al opuesto, *polo sur*. Si apartamos la aguja de su posición de equilibrio, oscila un momento y luego vuelve a ella. Este fenómeno ha sido aprovechado en la brújula, para orientarse

Cómo reconocer un polo

Si se aproxima el polo norte de una aguja magnética al polo norte de otra, se repelen; lo mismo sucede si se aproxima un polo sur a otro polo sur. En cambio, un polo sur y un polo norte se atraen:

Polos del mismo nombre se rechazan; polos de nombres contrarios se atraen.

De manera que si tenemos un imán y no conocemos sus polos, bastará con acercar uno de ellos a una aguja magnética; si éste es atraído por el polo norte de la aguja, ese extremo será el polo sur de nuestro imán, y el otro, naturalmente, el polo norte.

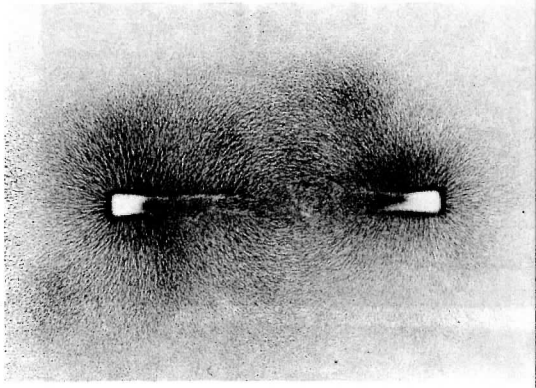
Campo magnético

Se llama campo magnético de un imán a toda la región del espacio en donde se hace sentir su influencia. El campo de cualquier imán es infinito; pero en la práctica su influencia sólo es perceptible a una distancia más o menos grande, según el poder del imán y la sensibilidad del instrumento empleado para detectarlo. Como podremos apreciarlo a lo largo de nuestro estudio, la noción de campo es la más importante de todas las relacionadas con los fenómenos magnéticos.

Los espectros magnéticos

Si espolvoreamos limaduras de hierro sobre un vidrio o una cartulina colocados sobre uno o varios

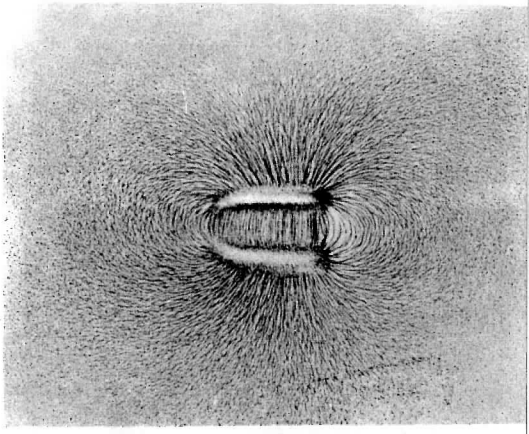
imanes, obtendremos una figura llamada *espectro magnético*, que nos demostrará visualmente la forma del campo. Las limaduras se disponen formando líneas, llamadas *líneas de fuerza del campo magnético*. Hay una manera muy sencilla de "fotografiar" las líneas de fuerza, utilizando papel al ferroprusiato, que es un papel empleado comúnmente para copiar planos y que puede adquirirse en cualquier casa que venda artículos para dibujo. Trabajando en la penumbra, se espolvorea la cara sensible del papel con una ligera capa de limaduras de hierro; con un imán se obtiene luego el espectro deseado; por último se expone el papel a la luz solar directa durante unos cinco minutos; luego se quitan las limaduras y se lava el papel con agua, hasta que desaparece el color amarillo; por último se lo seca colocándoselo invertido sobre una lámina de vidrio. Una vez seco, el papel muestra claramente dibujado el espectro magnético.



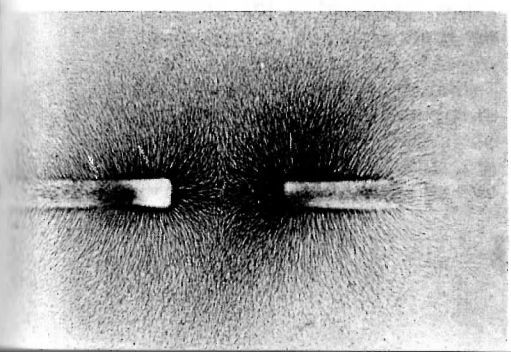
Espectros de una barra imanada y de una herradura.

Los imanes quebrados

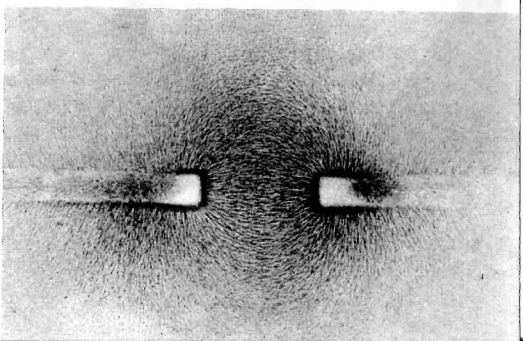
Tomemos una aguja de tejer e imanémosla; si luego la partimos en dos, de modo que una de las

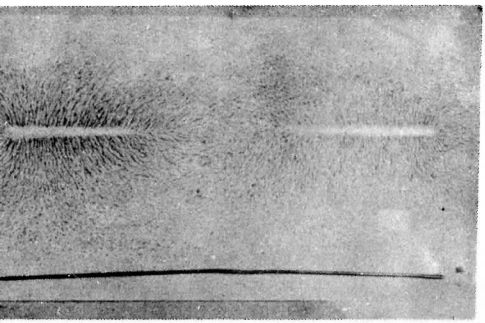


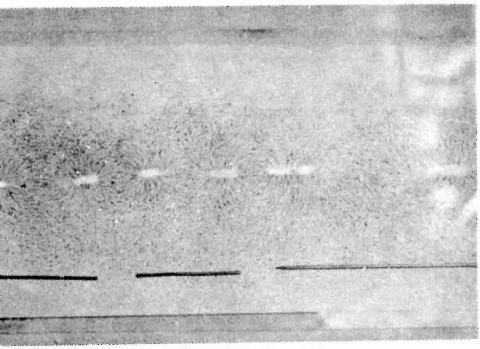
Espectro de dos polos del mismo nombre.



Espectro de dos polos de distinto nombre.







Espectro de una aguja de tejer imanada. Luego de obtenido el espectro se retiró la aguja de debajo del vidrio y se la colocó sobre el papel. Abajo (fig. 2): el espectro de la misma barra partida en tres trozos.

partes contenga lo que era el polo norte, y la otra, el polo sur, ¿tendremos un polo norte aislado y un polo sur aislado? El espectro magnético muestra que cada trozo se ha transformado, a su vez, en un imán, cada uno con sus dos polos. Cortemos ahora en dos trozos una de las dos partes anteriores; hagamos nuevamente el espectro: tendremos ahora tres imanes, cada uno con sus respectivos polos.

Según esto:

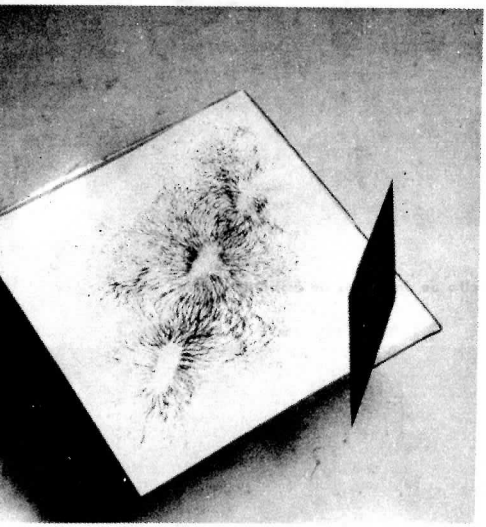
No se puede tener un polo aislado; siempre se tendrán por lo menos dos, de nombres contrarios.

¿Cuántos polos tiene un imán?

Por lo general un imán tiene dos polos, pero hay imanes que tienen más; en la figura se muestra un espectro que denuncia que hay un polo en cada extremo y uno en la parte media. Como se ve, no se exagera al decir que el espectro "visualiza" el campo magnético de un imán, pues gracias a él podemos saber, precisamente, cómo es ese campo.

¿Qué representan las líneas de fuerza?

Sabemos que un imán atrae a un trozo de hierro con una fuerza

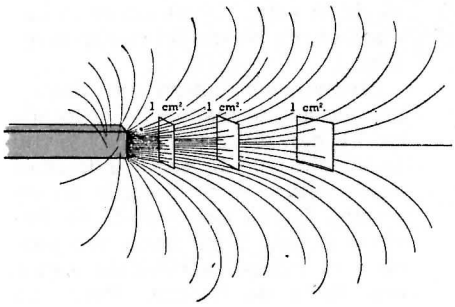


El espectro revela que esta aguja magnética tiene tres polos.

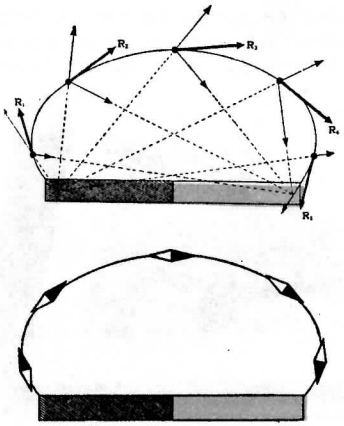
tanto mayor cuanto menor es la distancia que los separa. Esto mismo puede expresarse diciendo que *la intensidad del campo magnético es mayor cerca de los polos.* Por otra parte, en los espectros magnéticos se observa que cerca de los polos, las líneas de fuerza están más apretadas, de modo que resulta natural aceptar que el campo magnético tiene mayor intensidad donde mayor es la densidad (número de líneas que atraviesa cada centímetro cuadrado) de las líneas de fuerza.

El espectro de un imán en herradura muestra una de las razones por las cuales se emplea mucho esta forma de imán: el campo es muy intenso entre ambos polos, mucho más que si al mismo imán se lo enderezara y se le diera forma de barra.

CÓMO CONSTRUIR UN IMÁN EN HERRADURA. Puede ser útil disponer de un pequeño imán en herradura en cualquier momento. Para construirlo se toma una aguja de acero, se la calienta al rojo y se le da forma de herradura; luego se la sumerge (mientras está al rojo) bruscamente en agua fría, para templarla, y finalmente se la imana, arrollándole un cable conductor conectado a una pila.



El campo es más intenso donde mayor es la intensidad de líneas.



Un "granito" de polo norte, para ir desde el polo norte hasta el polo sur recorre una trayectoria que es, precisamente, una línea de fuerza. Una aguja magnética se coloca siempre tangente a la línea de fuerza.

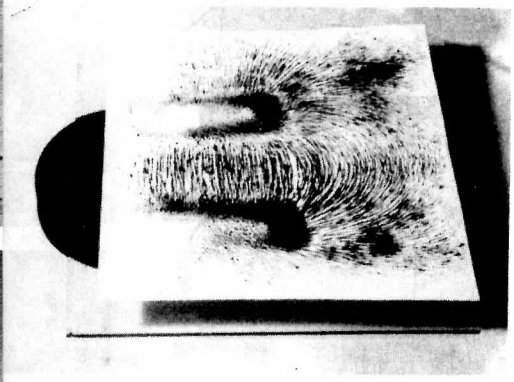
Las líneas como trayectorias

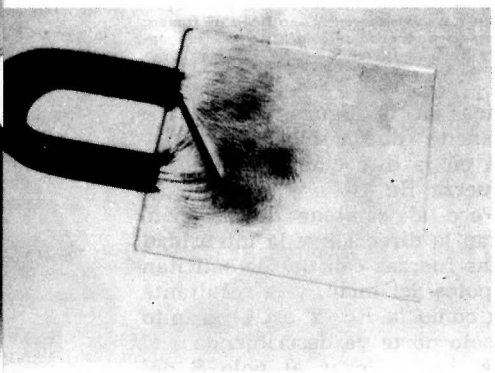
Imaginemos que por algún medio hubiéramos conseguido aislar un "granito" del polo norte de un imán. Si lo colocamos en el campo de otro imán, el polo N de éste lo rechazará, y el S lo atraerá; de manera que la fuerza resultante tendrá una dirección como la señalada en la figura, y nuestro "imancito" de un solo polo se moverá en la dirección y sentido de la fuerza R_1.

Pero al cambiar de posición, varían la dirección y la intensidad de las fuerzas con que lo solicitan los polos del imán, y la resultante será como la R_2. Y así el granito de polo norte va describiendo una línea, hasta llegar al polo S del

imán. A esta trayectoria se la llama *línea de fuerza del campo magnético.*

Imaginemos ahora una pequeñísima aguja magnética colocada en el campo magnético de un imán. Su polo N, como indicamos antes, estará sometido a la acción de una fuerza que tratará de llevarlo al polo S del imán que produce el campo, haciéndole seguir una línea de fuerza. Pero una fuerza igual y opuesta tratará de llevar su polo S hasta el polo N del imán. En consecuencia, la aguja magnética queda en reposo, colocándose su eje tangente a la línea de fuerza que pasa por ese lugar.





El campo del imán, y el campo del mismo imán con la presencia de un clavo: en este último caso, las líneas de fuerza se deforman para pasar por dentro del clavo.

Conviene atribuir un sentido a las líneas de fuerza, y se ha convenido en admitir que van desde el polo norte hacia el polo sur, es decir, el sentido en que se movería nuestro "granito" de polo norte colocado en la línea.

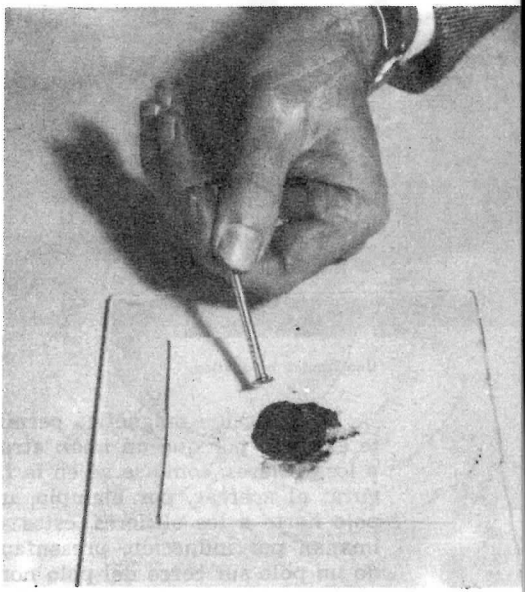
Obsérvese que con el mismo derecho pudo convenirse lo contrario, si en lugar de un granito de polo norte hubiéramos estudiado lo que le pasa a un granito de polo sur. Es como toda convención, arbitraria, y tiene por objeto que en todo el mundo se asigne un mismo sentido a las líneas de fuerza.

Permeabilidad magnética

Si en el campo magnético de un imán se interpone un trozo de hierro, se observa que las líneas de fuerza del campo sufren una modificación, acercándose al trozo de hierro, como si prefirieran pasar a través suyo en lugar de seguir por el aire. Por esto se dice que el hierro es más *permeable* que el aire a las líneas de fuerza. El hierro dulce es unos cientos de veces más permeable que el aire; para fines especiales se fabrican aleaciones de gran permeabilidad. La permeabilidad es una característica importante en un material, pues cuanto más permeable sea, más intensamente podrá ser imanado.

La permeabilidad del hierro permite conservar durante mucho tiempo el magnetismo de un imán, cerrando con un puente de hierro el "circuito" de las líneas de fuerza.

Una simple barra de hierro (un clavo) no atrae limaduras . . . pero acercándole un imán sí las atrae: se ha transformado en un imán.

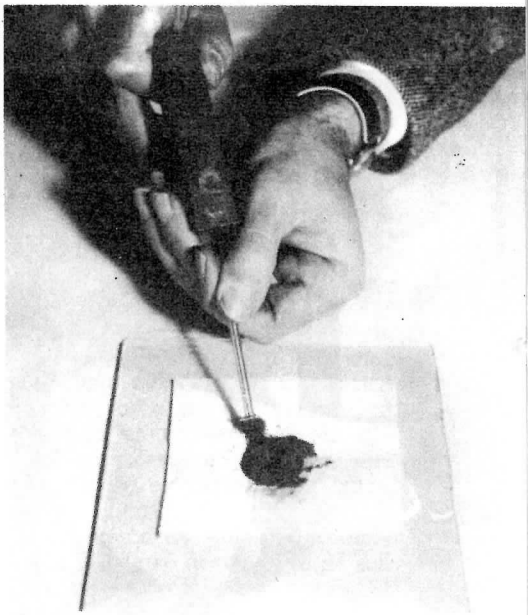


Magnetismo inducido

Si tocamos limaduras de hierro con una barra de hierro dulce, naturalmente que no las atraerá, puesto que no es un imán. Pero repitamos la experiencia manteniendo un imán cerca de la barra de hierro dulce; ésta, ahora las atrae. La sola presencia de un imán la ha inducido a transformarse en imán. Hemos descubierto así otro medio para imanar el hierro: la *imanación por inducción.* El imán se llama *inductor*, y el trozo de hierro, *inducido.*

Si alejamos el inductor, vemos que del inducido se desprenden las limaduras: ha dejado de ser imán. La imanación inducida, dura en el hierro mientras el inductor está cerca.

Pero, ¿cuál es el polo norte del imán inducido? Supongamos que hayamos acercado el polo sur del inductor. Por el método de la aguja magnética sabremos cuál es el polo norte del imán inducido, y así comprobaremos que frente al polo sur del inductor, el inducido presenta un polo norte. Si acercáramos el polo norte inductor, en el inducido se formaría, frente a él, un polo sur. Es decir:



El imán induce, en el extremo más cercano del inducido, un polo de nombre contrario al que se le ha acercado.

Una cadena magnética.

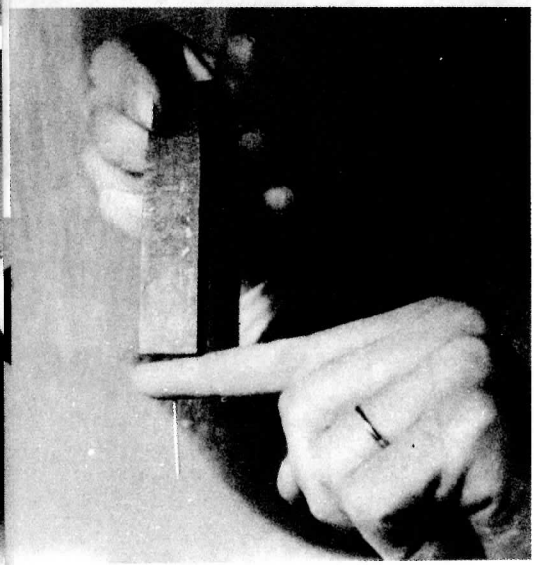
La inducción magnética permite explicar por qué un imán atrae a los alfileres, como se ve en la figura; al acercar, por ejemplo, un polo norte a los alfileres, éstos se imanan por inducción, presentando un polo sur cerca del polo norte inductor, y así son atraídos; además, cada uno induce a otro, y así se forma una verdadera cadena magnética.

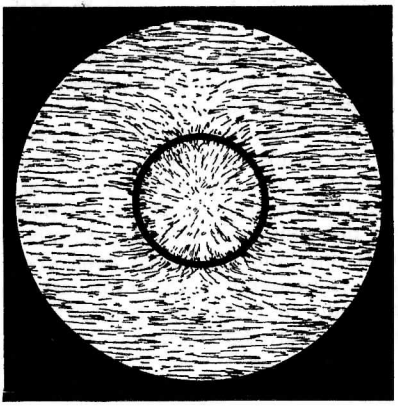
La acción magnética se ejerce a través de todos los medios

La atracción y la repulsión magnética no hallan obstáculos. El hecho mismo de que hayamos podido formar espectros magnéticos a través del vidrio o la cartulina nos lo prueba. Si se interpone una pantalla de hierro, la acción también se ejerce, aunque muy disminuida, porque la mayor parte de las líneas de fuerza se meten dentro o se acercan mucho al hierro.

El campo magnético terrestre

Hemos dicho que una aguja magnética colocada en el campo de

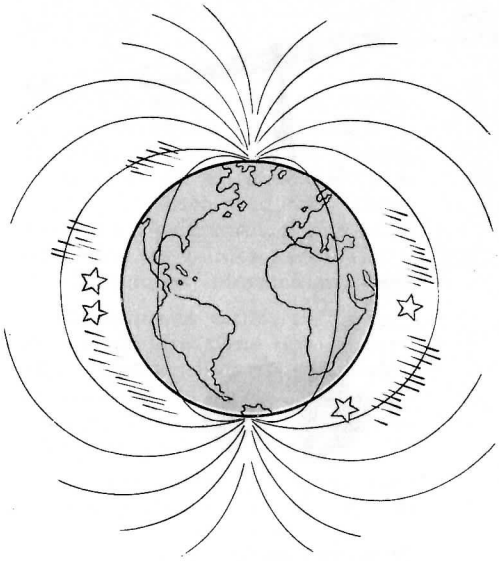




Las acciones magnéticas se ejercen a través de todos los medios. Pantalla magnética: como las líneas de fuerza prefieren pasar por dentro del hierro, en el espacio interior del cilindro de hierro el campo magnético es muy débil.

un imán, se orienta de tal modo que es tangente a la línea de fuerza que pasa por su centro. Ahora bien: si una aguja magnética alejada de todo imán se apoya o suspende por su centro de gravedad, inexorablemente tomará la dirección norte-sur. ¿Qué significa esto? Que, dado que la aguja se orienta, ella está en un campo magnético, y como se orienta en dirección norte-sur, las líneas de fuerza de ese campo tienen esa dirección. Pero, ¿de quién es el campo magnético donde estamos sumergidos, como lo comprueban las brújulas? De nuestro planeta. Hace mucho tiempo que se considera a la Tierra como un imán, cuyos polos están cerca de los polos geográficos, aunque no coinciden con ellos. Como por convención se llama polo norte de un imán al que señala el norte de la Tierra, y como polos de distinto nombre se atraen, el polo magnético que está cerca del polo geográfico norte es el polo sur magnético. Como resulta incómodo llamar polo sur magnético al que está próximo al polo norte geográfico, por un acuerdo internacional se resolvió llamar polo norte magnético al que está cerca del polo geográfico del mismo nombre, y análogamente para el polo sur.

Los polos magnéticos no sólo no coinciden con los geográficos, sino que su posición varía en el tiempo. Una de las últimas determinaciones de la situación del polo norte magnético, realizada por una expedición aérea británica, comprobó que dicho polo se encuentra a unos 2 400 km del polo norte, en unas islas al norte de Canadá, a 73° de latitud norte y 98° de longitud oeste de Greenwich. En cuanto al polo sur magnético, se encuentra en el continente antártico, cerca de la Tierra Victoria del Sur, a 72° de latitud sur y 155° de longitud oeste de Greenwich, aproximadamente a 2 000 km del polo sur geográfico.

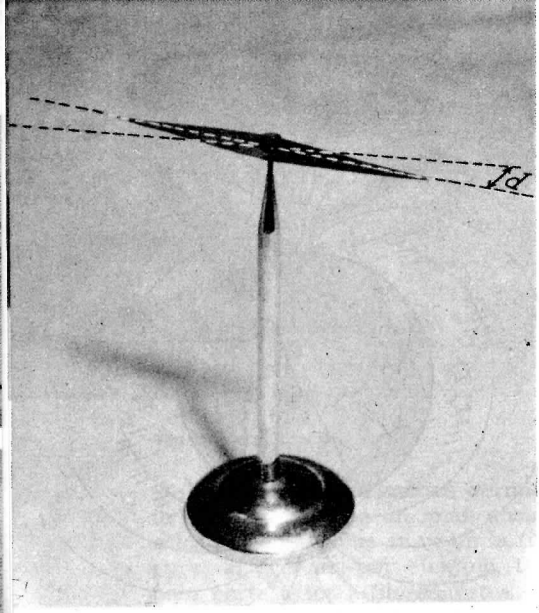


La Tierra es un gigantesco imán.

Declinación magnética

Si los polos magnéticos de la Tierra coincidieran con los polos geográficos, una aguja magnética colocada sobre un eje vertical se orientaría exactamente en la dirección norte-sur geográfica, coincidiendo con el meridiano geográfico del lugar.

Pero como los polos no coinciden, la aguja se desvía algo de esa dirección, orientándose según el *meridiano magnético* del lugar.



Declinación magnética.

El ángulo d que forma la aguja magnética con la dirección norte-sur geográfica, se llama declinación magnética del lugar.

La declinación magnética en Buenos Aires es de alrededor de 1°. En otros lugares, la declinación magnética es distinta; por eso hay que decir el lugar donde se toma la declinación. El conocimiento de la declinación –o variación, como la llaman los navegantes– es muy importante para la navegación, por lo cual se la mide en todos los lugares posibles, pues conociendo la declinación del lugar en que se encuentran, los navegantes pueden corregir la indicación de su brújula y seguir el rumbo exacto.

Existe un meridiano magnético en donde la declinación es cero, es decir que colocada en él, la brújula señala exactamente la dirección norte-sur geográfica. El descubridor del meridiano magnético de declinación nula fue Cristóbal Colón, en uno de sus viajes a América. Colón no era sólo un amante de los viajes, sino también un hombre de ciencia, con conocimientos bastante serios de la ciencia de su época. Durante sus viajes realizó observaciones científicas, entre ellas la que citamos; también inventó un método para orientar un barco, basado precisamente en la declinación magnética, y lo empleó con buen éxito en sus viajes.

Inclinación magnética

Si se apoya una aguja por su punto medio, sobre un eje horizontal de modo que pueda girar libremente alrededor de él, la aguja oscila un rato, y luego se detiene en una posición que no es la horizontal.

Se llama inclinación magnética de un lugar, al ángulo i que forma la aguja magnética colocada en ese lugar, con el plano horizontal.

Lo mismo que la declinación, la inclinación magnética depende del lugar. En Buenos Aires, la aguja de inclinación forma con el plano horizontal unos 30°, con el polo norte más levantado que el polo sur. Hay lugares en el hemisferio norte, en que el ángulo vale también 30°, pero con el polo norte hacia abajo y el sur hacia arriba. Para distinguirlos, a éstos se

les atribuye el signo más, y a aquéllos, el signo menos. De modo que la inclinación magnética de Buenos Aires es de unos – 30° *.

Con los datos de inclinación y declinación magnéticas se dibujan los mapas magnéticos, en donde hay dos juegos de líneas: las *isógonas*, que unen los puntos de igual declinación, a la que se llama también *longitud magnética*, y las *isóclinas*, que unen los lugares de igual inclinación magnética, a la que también se llama *latitud magnética*. Hay un ecuador magnético, que no coincide con el geográfico, en el cual la inclinación es nula, de modo que la aguja de inclinación permanece horizontal. En los polos magnéticos, en cambio, la aguja se mantiene vertical, es decir, la inclinación es de ± 90°.

La brújula

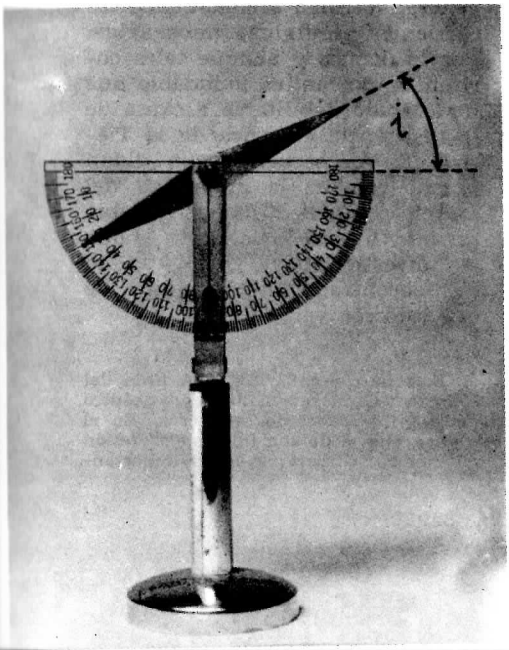
Es una aguja imanada, apoyada por su centro de gravedad en un punto del fondo de un cilindro de bronce. En el fondo del cilindro hay un disco graduado, llamado *rosa de los vientos*, donde están señalados los puntos cardinales y las direcciones intermedias.

En la que se utiliza en los barcos, el cilindro tiene una suspensión especial, llamada *cardánica*, de modo que la brújula está siempre horizontal, a pesar de los movimientos de la nave.

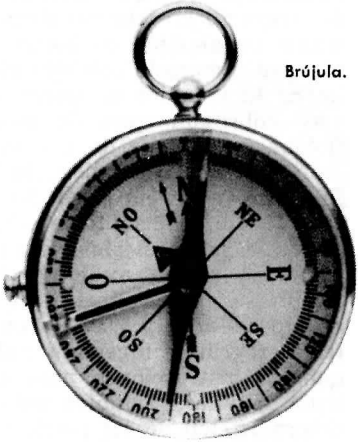
La historia de la brújula presenta aspectos de interés. Según algunos historiadores, mil años antes de Cristo existía ya en la

---

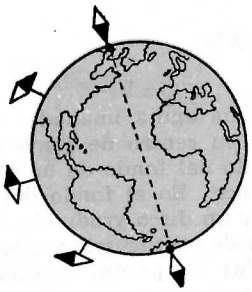
* El 1º de junio de 1950, la inclinación magnética de Buenos Aires era de —30° 12'; la variación anual es de —05' 6". (Datos del Servicio Meteorológico Nacional.)



Inclinación magnética.



Brújula.



La Tierra se comporta como la esfera de la experiencia de Gilbert.

China un aparato magnético de forma de hombre: el brazo extendido de este muñeco indicaba permanentemente el sur. Parece que estos muñecos eran empleados en carretas que hacían largos viajes por tierra.

Los árabes también conocieron desde muy antiguo la brújula. En el siglo XIII vivía en El Cairo el sabio minerólogo Quibchaqui. Durante un viaje que hizo de Siria a Alejandría, vio que la dirección del trayecto la determinaban mediante un alambre de hierro previamente imanado con una piedra imán. El alambre de hierro, apoyado sobre un trozo de madera, flotaba en el agua de una vasija.

No se sabe cómo llegó la brújula a los países europeos. Sin embargo, está perfectamente establecido que ya en el siglo XIII se la empleaba para navegar y para orientarse en las minas. Hay un escrito del año 1269, de un tal Petro Peregrinus, ingeniero militar, que da instrucciones para construir brújulas. También indica la determinación de los polos, y habla de la ley de atracción de los polos de distinto nombre, y de la repulsión de los del mismo nombre.

El misterio del magnetismo terrestre

Pese a todos los esfuerzos realizados, la Física no ha podido explicar todavía por qué la Tierra se comporta como un gigantesco imán. La teoría más sencilla, según la cual la totalidad del planeta se halla magnetizado, tropieza con la dificultad de que tan sólo una delgada capa exterior, cuyo magnetismo no es lo suficientemente intenso como para provocar el campo magnético terrestre, está lo suficientemente fría como para retener la magnetización. Las capas centrales se encuentran a temperaturas muy superiores a las de Curie, por lo que no es posible que se encuentren magnetizadas.

Otra teoría sostiene que la Tierra es un gigantesco electroimán, pero lo cierto es que no aporta pruebas positivas sobre cómo se generan y cómo se mantienen las corrientes eléctricas necesarias. Por lo demás, y aunque tales corrientes existan, es indudable que han debido debilitarse a causa de la resistencia eléctrica de la Tierra. En consecuencia, en algún pasado remoto, la intensidad del campo magnético terrestre debió ser muy intenso, y lo cierto es que las investigaciones geológicas no han encontrado ningún indicio de que esto sea verdad.

EL MÉDICO DE UNA REINA. A fines del siglo XVI, Guillermo Gilbert era médico de la reina Isabel de Inglaterra. En el tiempo que le dejaba libre su profesión de médico, Gilbert realizaba importan-

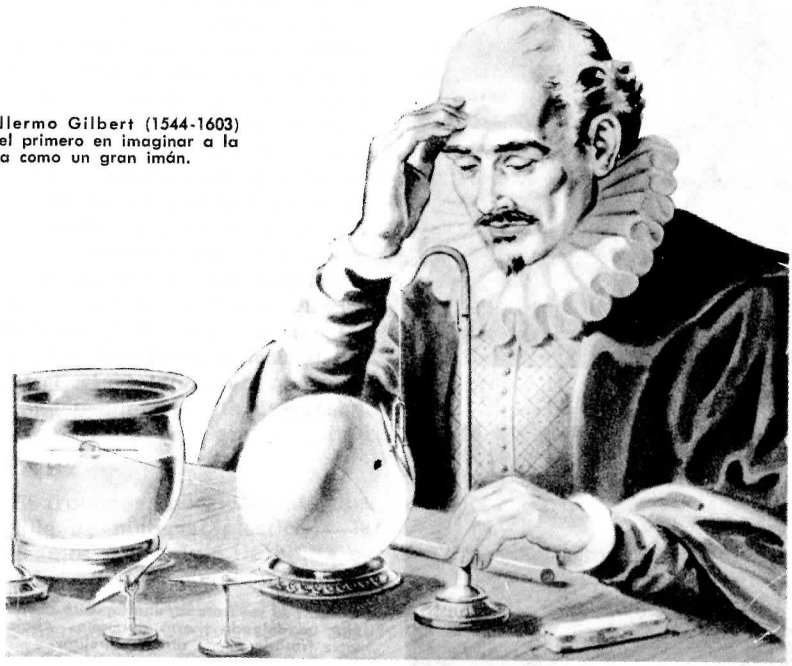
tes investigaciones en el terreno de la Física. La reina, admirada de sus trabajos, le acordó una pensión permanente, para que se dedicase a la investigación científica, sin preocupaciones para ganarse la vida.

El doctor Gilbert se preocupó especialmente del magnetismo y la electricidad, reiniciando más o menos sistemáticamente el estudio de esos fenómenos, descubiertos por Tales y abandonados durante toda la Edad Media. En su obra *De Magnete* reunió todo lo que se sabía en aquel tiempo de las fuerzas magnéticas, con el agregado de sus investigaciones personales.

Gilbert estudió el fenómeno de la inclinación de la aguja magnética y llegó a la conclusión de que la Tierra era una formidable esfera imanada, con dos polos magnéticos que estaban situados en las proximidades de los polos geográficos. Para probarlo, Gilbert hizo imanar una gran esfera metálica y suspendió una aguja magnética en diversas partes. La aguja se inclinaba más a medida que se acercaba a los polos del imán, como muestra la figura de pág. 186.

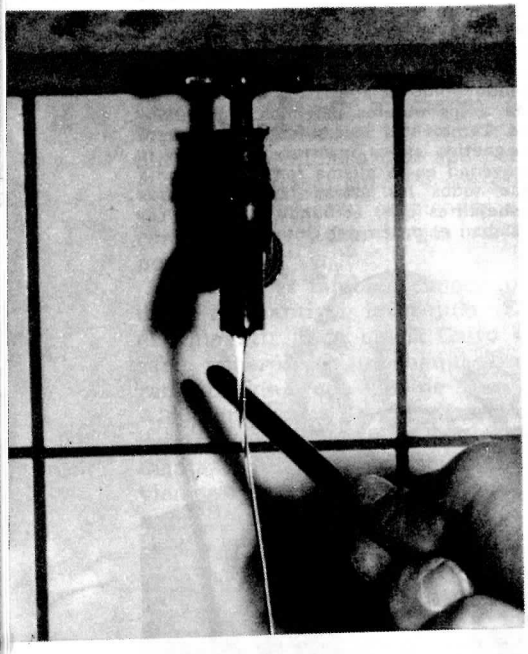
En el ecuador, la aguja queda horizontal, porque sus polos son atraídos con igual fuerza por los polos N y S de la esfera; en cambio, en otra posición la aguja se inclina hacia el polo de la esfera que está más cerca.

El doctor Gilbert estaba admirado de los fenómenos magnéticos, y le parecía maravilloso que un imán tuviese la propiedad de atraer una aguja a una gran distancia. La reina lo escuchaba con gran respeto, y en la corte tenía prestigio de mago. Gilbert explicaba a la reina que los imanes tenían en su interior una sustancia invisible, que saliendo como si fuera un brazo, envolvía a los objetos cercanos, atrayéndolos. También la Tierra tenía ese espíritu magnético en su interior. Explicaba la gravedad en la misma forma, y suponía que todos los astros tenían espíritus semejantes que, actuando entre sí, regulaban el orden del Universo.



Guillermo Gilbert (1544-1603) fue el primero en imaginar a la Tierra como un gran imán.

13 FENÓMENOS ELÉCTRICOS SENCILLOS



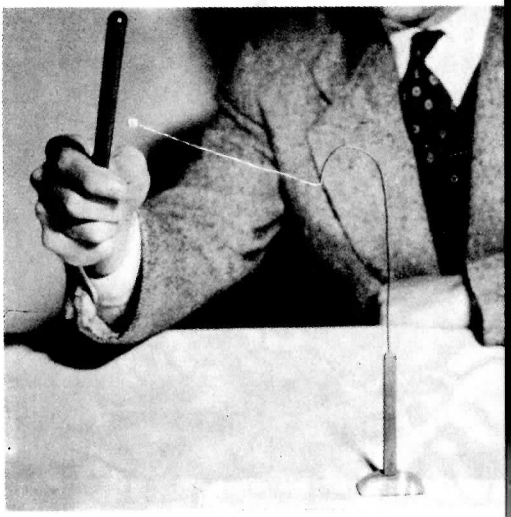
El descubrimiento de Tales

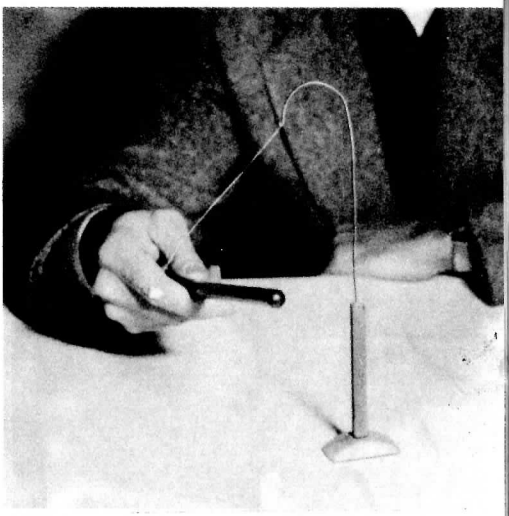
Unos seis siglos antes del advenimiento de Cristo vivía en Mileto, ciudad del Asia Menor, un hombre famoso, llamado Tales. Además de comerciante era matemático, astrónomo, estadista y filósofo. Parece que fue este hombre múltiple y curioso quien descubrió que al frotar una barra de ámbar con un paño o un trozo de piel, la barra adquiría la notable propiedad de atraer pequeños objetos, muy livianos, como barbas de pluma o cabellos. Así se inició la que llegaría a ser una de las ramas más complejas e importantes de la ciencia y la técnica modernas. No pudo imaginar Tales que de fenómeno tan sencillo, si bien tan curioso, se derivaría, con el transcurrir de los siglos y con la labor de muchos hombres, la luz eléctrica, la radiotelefonía, la televisión, etc.

Arriba): Al ser frotada, una lapicera puede desviar un delgado chorro de agua. Abajo): El lacre frotado puede atraer papelitos.

Electricidad por frotamiento

La palabra electricidad deriva de *electrón*, que en griego quiere decir *ámbar*; sin embargo los griegos no la usaron, pues fue Gilbert, quien la introdujo. El mismo Gilbert fue el primero que estudió sistemáticamente los fenómenos eléctricos, y entre otras cosas descubrió que no sólo el ámbar se electriza por frotamiento, sino también muchos otros materiales, como el vidrio, el lacre, la resina y la madera. Esto se puede comprobar en cualquier momento: tómese una barra de lacre, o de vidrio (pueden servir los anteojos), o una regla de material plástico, frótesela, y se comprobará que atrae a pequeños trocitos de papel.

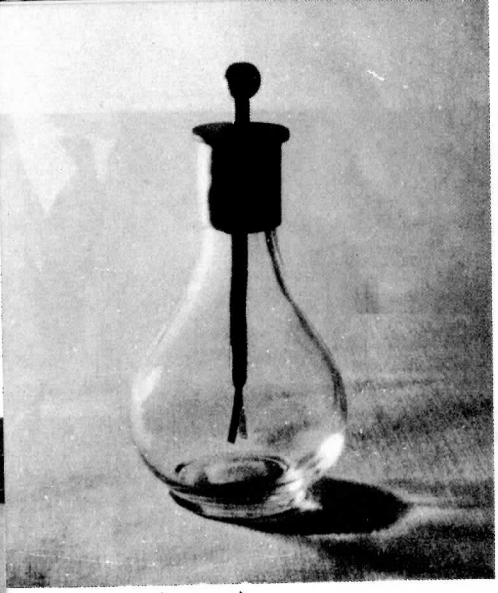




Atracciones y repulsiones eléctricas

Para estudiar los fenómenos eléctricos producidos por frotamiento, conviene construir un péndulo como el de la figura: un pie de madera, un alambre que sostiene, por medio de un hilo de seda, una pequeña bolita de corcho. Este aparatito se llama *péndulo eléctrico*.

Si frotamos enérgicamente una reglilla de material plástico y la acercamos al péndulo, la bolita es atraída; pero en cuanto se ponen en contacto, la bolita es rechazada violentamente. Todo esto es bastante misterioso, sobre todo el hecho de que primero la bolita sea atraída, y luego de tocar, rechazada. Esto preocupó mucho a los físicos, hasta el siglo XVIII, y ya veremos cómo se trató de explicarlo.



El electroscopio.

Electroscopio en funcionamiento.

El electroscopio

Este aparato consta de dos hojuelas metálicas, muy delgadas y livianas, que penden de una varilla metálica; el conjunto está encerrado en un recipiente de vidrio. Si se toca la bolita en que termina la varilla, con una barra de ebonita, o con una regla de material plástico previamente frotadas, se observará que las hojuelas se separan. Si se la toca antes de frotar, las hojuelas permanecen inmóviles debido a que no hay electricidad. El electroscopio permite, pues, decidir si un cuerpo tiene electricidad o no; de ahí su nombre: *electro* (de electricidad) y *scopio* (de mirar).

Electricidad positiva y electricidad negativa

El marqués Du Fay, en 1734, intentó la primera explicación de las atracciones y repulsiones. Él y otros físicos de su época habían observado que si se toca la bolita del péndulo con una barra de vidrio frotada, la bolita es rechazada, pero que si inmediatamente se le acerca una barra de resina frotada, la bolita es atraída por la barra. Esto hizo pensar a Du Fay que había dos clases de electricidad: una *electricidad del vidrio*, o vítrea, y otra *electricidad de la resina*, o resinosa. Actualmente se las llama *positiva* y *negativa*, respectivamente. Podría pensarse que otras sustancias se cargan con otras clases de electricidad –distintas de la del vidrio y de la de la resina–, pero el péndulo prueba

que *sólo hay dos clases de electricidad, y que todos los cuerpos se electrizan por frotamiento: positivamente, o negativamente.*

La primera ley de la electricidad

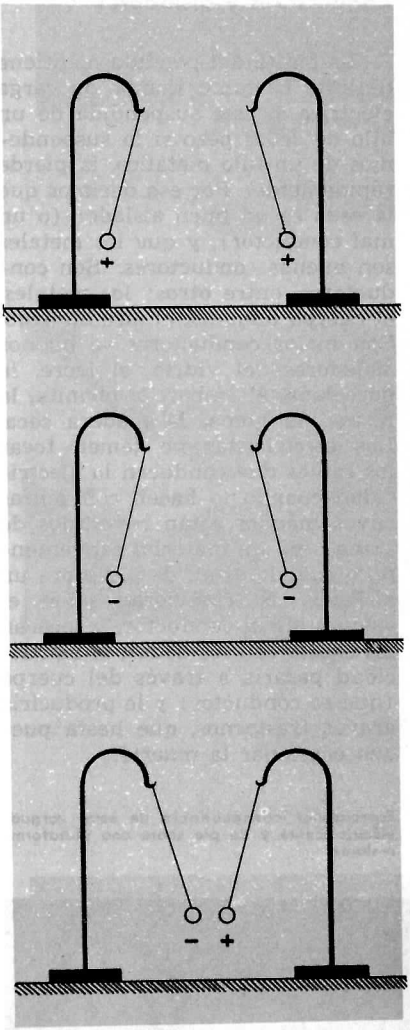
Con dos péndulos eléctricos, una barra de vidrio y otra de ebonita, se pueden realizar las siguientes experiencias:

1) Se frota una barra de vidrio y se tocan con ella las bolitas de los dos péndulos; las dos bolitas tienen electricidad positiva, recibida de la barra. Si colocamos las bolitas frente a frente, se rechazan.

2) Se frota una barra de ebonita, y con ella se tocan las bolitas, que por lo tanto tienen ahora electricidad negativa; colocadas frente a frente, también se rechazan.

3) Luego de frotar las dos barras, con la de vidrio tocamos una de las bolitas, y con la de ebonita la otra. Al colocarlas frente a frente, las bolitas se atraen.

Como resultado deducimos:



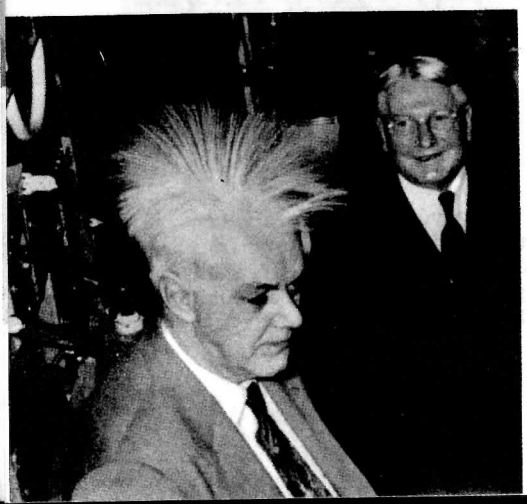
Electricidades del mismo nombre se rechazan. Electricidades de distinto nombre se atraen.

Apoyándonos en esta ley, ¿cómo podríamos determinar con qué electricidad se carga una regla de material plástico cuando se la frota?

Conductores y aisladores

La bolita del péndulo mantiene durante bastante tiempo su carga eléctrica si está suspendida de un hilo de seda; pero si la suspendemos de un hilo metálico, la pierde rápidamente. Por eso decimos que la seda es un buen aislador (o un mal conductor), y que los metales son buenos conductores. Son conductores, entre otros: los metales, el cuerpo humano, el aire húmedo. Son malos conductores –o buenos aisladores– el vidrio, el lacre, la porcelana, el ámbar, la ebonita, la resina, la goma, la madera seca. Los electricistas no temen tocar los cables que conducen la electricidad cuando lo hacen con pinzas cuyos mangos están revestidos de goma o de un material conveniente, o cuando están de pie sobre un aislador. Si estuvieran sobre el suelo o algún conductor, y tocaran los cables con los dedos, la electricidad pasaría a través del cuerpo (que es conductor) y le produciría graves trastornos, que hasta pueden ocasionar la muerte.

Espectacular consecuencia de estar cargado eléctricamente y de pie sobre una plataforma aislante.



El primero que advirtió la diferencia entre aisladores y conductores fue el inglés Gray, en 1729, al comprobar que para electrizar a un niño (claro que con pequeñas cantidades de electricidad, sin hacerle correr ningún peligro) era necesario colocarlo sobre una plancha de resina, o suspenderlo con hilos de seda, antes de darle la carga eléctrica. Entonces se observaba que los cabellos del niño se erizaban, pues como estaban cargados, se rechazaban entre sí, tal como las hojuelas del electroscopio.

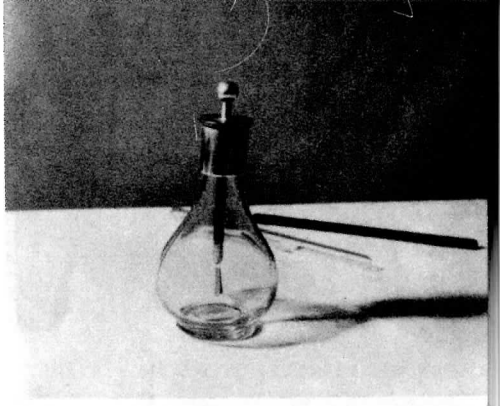
En cambio, si el niño estaba parado sobre una plancha metálica colocada sobre el piso, al darle la carga no sucedía nada, pues la electricidad se iba a tierra, a través del cuerpo y de la plancha metálica, que son buenos conductores.

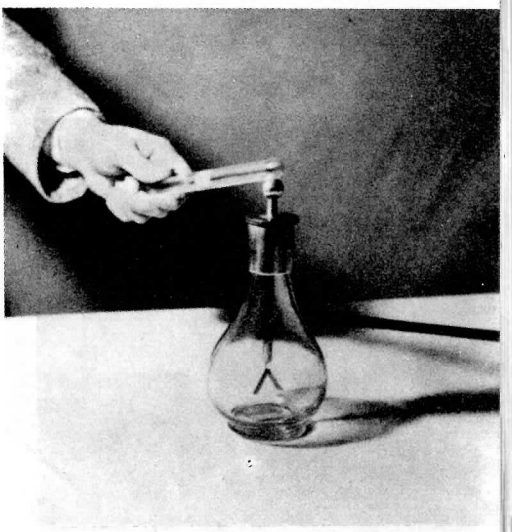
Todos los cuerpos se cargan

Durante mucho tiempo se creyó que la propiedad de electrizarse por frotamiento no existía en los metales, a los que se llamó *no eléctricos*. En efecto: si se frota una barra metálica y se la acerca a un péndulo, no se observa ninguna atracción. Ahora sabemos que también la barra metálica se carga con el frotamiento, pero como es conductora, las cargas producidas van a tierra, a través del cuerpo de quien la sostiene. Si al trozo de metal se le sostiene con un mango aislador, las cargas no pueden irse y la barra metálica queda electrizada.

Diferencia entre conductor y aislador. En un conductor, las cargas eléctricas se mueven sin

encontrar mayor resistencia; en los aisladores ocurre lo contrario. Si se frota una zona de una barra de ebonita, las cargas producidas quedan en esa zona; en una barra metálica, las cargas que se producen al frotar sólo una zona ocupan toda la barra. Por esa misma razón, si con una barra de ebonita frotada se toca un electroscopio, las hojuelas se abren, pero se abren más si se hace deslizar la barra de modo que toda la zona frotada toque la bolita.

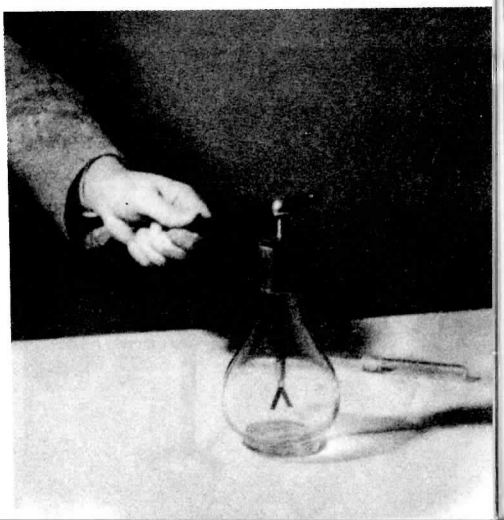


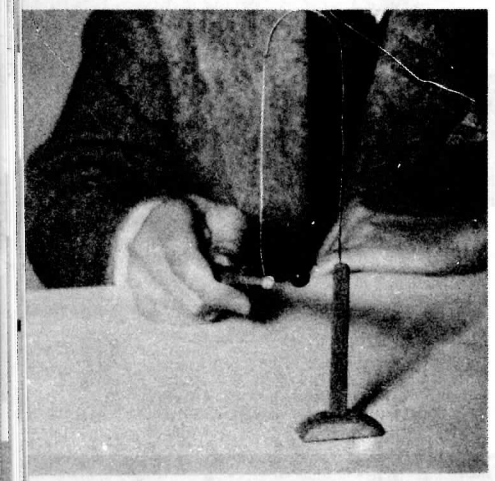


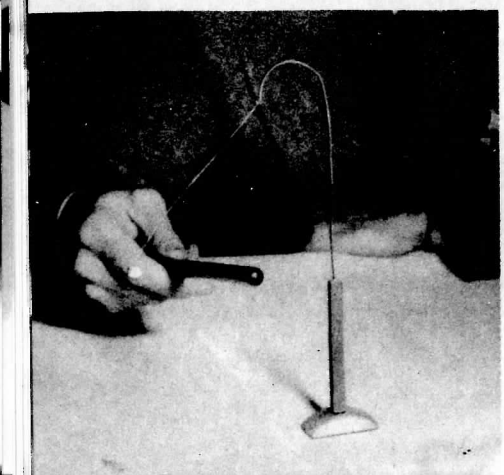
El funcionamiento del electroscopio

La ley de las atracciones y repulsiones y la conductividad de los metales explican el funcionamiento de un electroscopio. Si se frota una barra de vidrio, por ejemplo, y con ella se toca la barra metálica del electroscopio, las cargas eléctricas positivas de la barra de vidrio pasan al electroscopio y llegan hasta las hojuelas. Como éstas tienen cargas del mismo nombre, se rechazan y quedan abiertas (véase figura central).

Si se frota de nuevo la barra de vidrio y se vuelve a tocar el electroscopio, la llegada de nuevas cargas queda revelada por un aumento de la separación de las hojuelas. Si se frota en cambio una barra de ebonita, y con ella se toca el electroscopio, la llegada de cargas negativas se revelará por la disminución de la separación de las hojuelas. (Véase figura de abajo.) Y si la nueva carga negativa es mayor que la positiva que poseían las hojuelas, és-







tas se cerrarán del todo y luego volverán a abrirse, pero ahora por la repulsión de las cargas negativas, en exceso sobre las positivas.

Sabido esto, ¿cómo podríamos averiguar la clase de electricidad con que se carga un cuerpo al ser frotado, empleando el electroscopio?

Producción simultánea de las dos electricidades

¿Por qué una barra de ebonita no atrae a un péndulo eléctrico, si previamente no se la frota? Porque la barra de ebonita posee cargas de los dos signos, en cantidades iguales y uniformemente distribuidas, de modo que la atracción que ejercen las positivas queda anulada por la repulsión de las negativas.

¿Qué pasa cuando se frota la barra con un paño? Se separan las dos clases de electricidad: la negativa queda en la barra de ebonita, y la positiva, en el paño. Sabíamos que la barra atrae la bolita de un péndulo; ahora probemos con el paño, acercándolo a un péndulo descargado: lo atrae. Y si lo acercamos a un péndulo cargado positivamente, lo rechaza, lo que prueba que sus cargas son positivas.

Las atracciones y repulsiones del péndulo

Ahora podemos explicar por qué la bolita del péndulo es atraída por una barra frotada, de ebonita, por ejemplo, pero es vio-

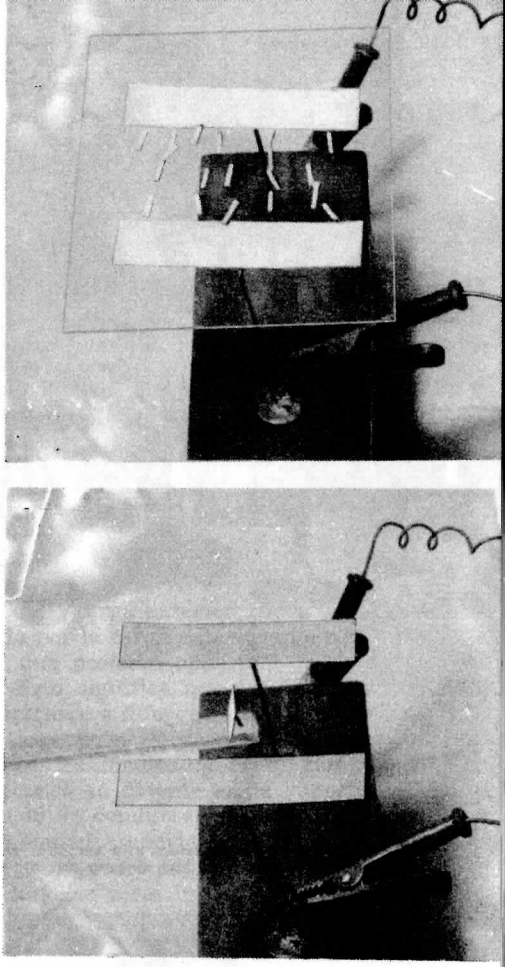
lentamente rechazada al instante de haberla tocado. Al acercar la barra, las cargas negativas de ésta atraen a las positivas de la bolita y rechazan a las negativas. Como las positivas están más cerca, prevalece la fuerza de atracción sobre la de repulsión, y la bolita es atraída (primera figura de página 194).

Pero cuando la bolita toca a la barra (segunda figura de pág. 194) cargas negativas de ésta pasan a la bolita, que queda cargada negativamente. Y ahora las cargas negativas de la barra y la bolita se rechazan (tercera figura de página anterior).

Campo eléctrico

Así como un imán crea a su alrededor un campo magnético, un cuerpo electrizado crea a su alrededor un *campo eléctrico*.

Entre ambos campos existen muchas analogías. Por ejemplo, en un campo eléctrico también hay líneas de fuerza. Se puede obtener un espectro eléctrico de la siguiente manera: sobre una placa de vidrio se pegan dos tiras de papel de estaño y se las conecta a los polos de una máquina electrostática*. Sobre la zona del vidrio comprendida entre ellas, se colocan tiritas de aluminio, sueltas, que al funcionar la máquina, se ponen paralelas entre sí, apuntando hacia las placas.



Arriba): Un espectro eléctrico. Abajo): La agujita revela la dirección de las líneas de fuerza del campo eléctrico.

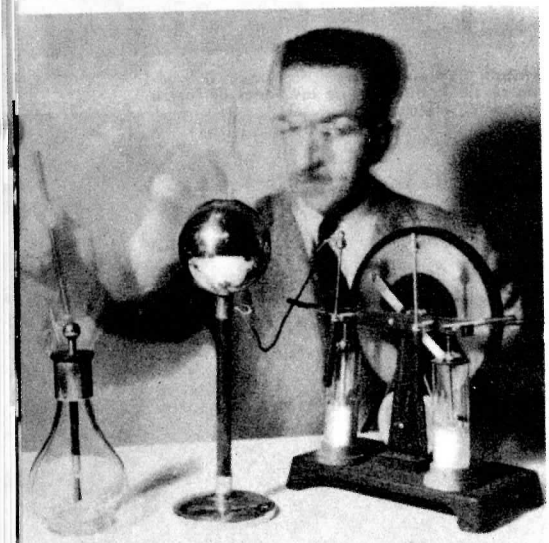
Sentido de las líneas de fuerza

Así como se convino en asignar un sentido a las líneas magnéticas, desde el polo N hacia el polo S, se ha convenido en asignar un sen-

* Las máquinas electrostáticas son aparatos con los cuales se pueden obtener mayores cantidades [illegible]ad que frotando una barra de lacre o vidrio. (Véase pág. 208.)

En la superficie exterior hay cargas.

A pesar de que la esfera está cargada, en su superficie interior no hay ninguna carga.



tido a las líneas de fuerza del campo eléctrico: *toda línea de fuerza de un campo eléctrico nace en una carga positiva y se dirige a una carga negativa.*

Como ocurre en un campo magnético, las líneas de fuerza de un campo eléctrico, tampoco pueden cortarse. (¿Por qué?)

También aquí la densidad de líneas de fuerza es un dato importante, porque *el campo eléctrico es tanto más intenso cuanto mayor es la densidad de líneas.*

El campo eléctrico puede investigarse con la ayuda del siguiente "detective": una laminita de aluminio muy delgada, de unos 2 cm de largo, montada sobre un eje de vidrio, de modo que pueda girar fácilmente. Colocada en un campo eléctrico, la laminita se orienta siguiendo las líneas de fuerza, en forma análoga a como lo hace una aguja imanada en un campo magnético.

Distribución superficial de las cargas

Sabemos que en los cuerpos conductores, las cargas eléctricas se mueven libremente. Ahora averiguaremos experimentalmente, por dónde se distribuyen las cargas cuando se las deposita sobre un cuerpo conductor. Se carga una esfera metálica hueca, sostenida por un pie aislador. Para investigar dónde están las cargas disponemos de un pequeño disco metálico, provisto de un mango aislador, y de un electroscopio.

1) Con el plano de prueba tocamos la superficie exterior de la esfera cargada, y luego el elec-

troscopio. Las hojuelas se separan. Por lo tanto, en la superficie exterior de la esfera hueca hay cargas eléctricas.

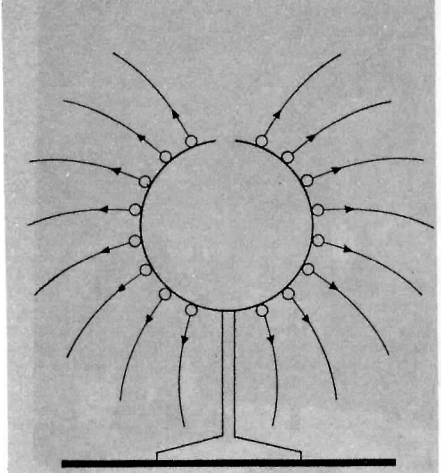
2) Se descarga el electroscopio tocándolo con un dedo: las cargas van a tierra.

3) Introducimos el plano de prueba dentro de la esfera y tocamos la *superficie interior*; lo sacamos y con él tocamos el electroscopio; ahora las hojuelas no se separan. Conclusión: *en la superficie interior de la esfera conductora electrizada no hay cargas eléctricas.*

Esta experiencia nos permite saber que:

La electricidad se distribuye en la superficie exterior de los conductores.

Parece extraño que estando cargado eléctricamente un cuerpo conductor, no tenga absolutamente ninguna carga en su interior; pero esto es explicable, porque como las cargas son todas del mismo signo, se rechazan entre sí y van a la superficie exterior, pues así están lo más lejos posible unas de otras.



Las cargas se van a la superficie repeliéndose unas a otras.

El campo en el interior de un conductor hueco

En el interior de un cuerpo conductor hueco y cargado, no sólo no hay cargas eléctricas sino que tampoco hay campo eléctrico. Si se introdujera la agujita de aluminio a que nos referimos en párrafos anteriores, o si tratáramos de obtener un espectro con tiritas de aluminio, se comprobaría que el campo es nulo, es decir, en el interior no hay acciones eléctricas, lo que se explica, porque la acción de cada carga exterior queda anulada por la carga exterior que ocupa una posición opuesta.

Esto significa que las acciones eléctricas, a diferencia de las magnéticas, no se ejercen a través de todos los medios, pues el campo eléctrico se detiene en la superficie de los conductores. Ésta es una propiedad importante del campo eléctrico, como podremos apreciarlo muchas veces.

En las convexidades hay más cargas

La electricidad se distribuye por la superficie exterior de los conductores, pero, ¿hay en cada centímetro cuadrado de la superficie el mismo número de cargas? Averigüémoslo con el plano de prueba y conductores de distintas formas, por ejemplo, la misma esfera de la experiencia anterior, y otro conductor de la forma que se ve en la figura de arriba.

En las partes llanas hay pocas cargas.

En las partes más convexas hay más cargas.

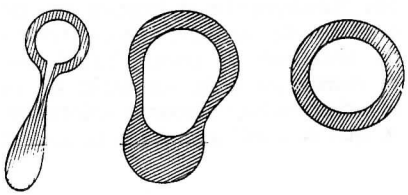
Carguemos la esfera, y con el plano de prueba vayamos tocando distintas partes de su superficie exterior, y cada vez llevemos el plano al electroscopio, para ver la separación de las hojuelas. Comprobaremos así que en la esfera las cargas están uniformemente distribuidas, es decir, en cada centímetro cuadrado de su superficie hay el mismo número de cargas. En el conductor de la segunda figura, hay mayor número de cargas en las partes más convexas que en las partes llanas.

Si llamamos *densidad eléctrica* al número de cargas que hay en cada centímetro cuadrado, podremos decir que *la densidad eléctrica en la superficie de un conductor es mayor en las partes más convexas.* Si representamos con un grisado la densidad eléctrica, se puede visualizar la diferente densidad de conductores de distintas formas.

Poder de las puntas

Si un cuerpo cargado tiene puntas, la densidad eléctrica es en ellas muy grande, tanto que si la densidad es suficientemente grande, las cargas allí acumuladas pueden saltar al aire. Las moléculas gaseosas se cargan entonces, y son violentamente repelidas por las

El sombreado visualiza la densidad eléctrica.



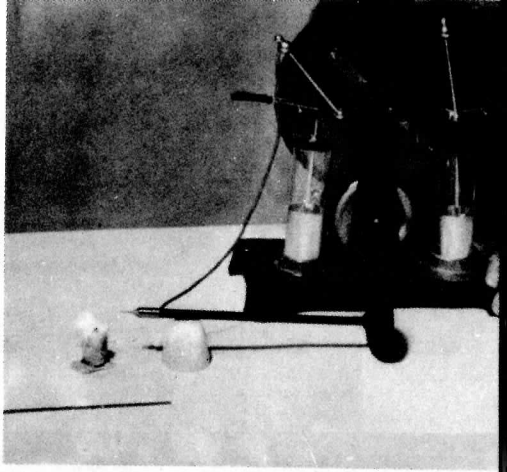
cargas del mismo signo que permanecen en el conductor. Se produce así el llamado "viento eléctrico", capaz de apagar una vela.

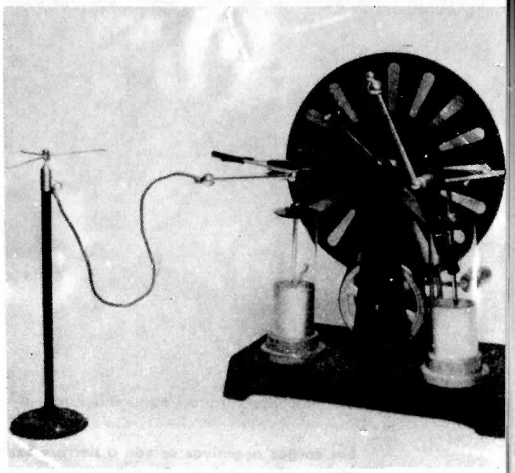
Inducción electrostática

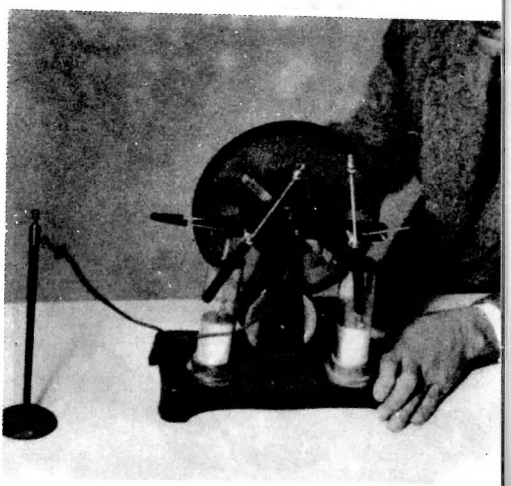
Consideremos una esfera metálica descargada, sostenida por un pie aislador. Recordemos qué quiere decir que un cuerpo está descargado, o en estado neutro: tiene cantidades iguales de cargas de ambos signos, y ambas igualmente distribuidas; de modo que todo sucede en sus alrededores como si no tuviera carga alguna.

Si acercamos a la esfera una barra cargada negativamente, las cargas negativas de la barra atraen las positivas de la esfera y rechazan las negativas; es decir: la parte de la esfera más cercana a la barra queda cargada positivamente, y la más alejada, negativamente. El electroscopio probará que está cargada.

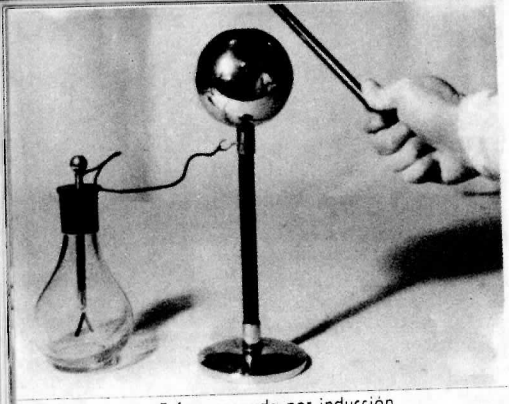
¿Qué ocurre si retiramos la barra que ha inducido a la esfera a cargarse? Como ya no hay quien







El molinete eléctrico está conectado a la máquina electrostática que todavía no funciona. Al funcionar la máquina, pasan cargas al molinete; éstas se acumulan en las puntas, saltan al aire y por reacción el molinete comienza a girar.



Esfera cargada por inducción.

las separe, las cargas vuelven a reunirse, y la esfera queda nuevamente en estado neutro.

Cómo cargar un cuerpo sin tocarlo

Aprovechando el fenómeno anterior, se puede cargar a un cuerpo *sin tocarlo con la barra electrizada.*

Por ejemplo, vamos a cargar un electroscopio empleando una barra de ebonita que, al ser frotada, se carga negativamente.

1) El electroscopio está descargado, de modo que las hojuelas están cerradas. Al acercar el cuerpo cargado, las hojuelas se abren, lo que interpretamos diciendo que las cargas (+) del electroscopio son atraídas por las (—) de la barra de ebonita, y ocupan la esferita del electroscopio, mientras que las cargas (—) son rechazadas y se ubican en las hojuelas.

2) Si se mantiene fijo el inductor (la barra de ebonita) y tocamos con un dedo la esferita del electroscopio, las hojuelas caen.

Electroscopio cargado por inducción.

Las cargas negativas se van a tierra y las hojuelas se cierran.
Las cargas positivas del electroscopio están retenidas en la esferita. Las hojuelas permanecen cerradas.

Las cargas positivas se distribuyen por todo el electroscopio: las hojuelas se abren.

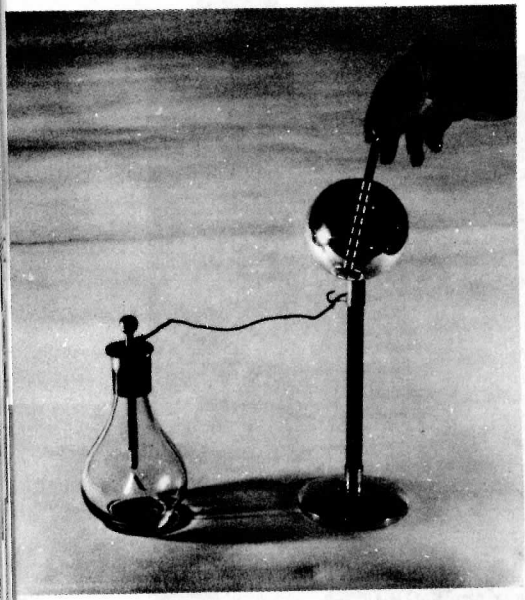
Las cargas (—) que estaban sobre las hojuelas han ido a tierra a través de nuestro cuerpo.

3) Retiramos el dedo, manteniendo siempre el inductor a la misma distancia del electroscopio. Las hojuelas continúan cerradas, porque las cargas (+) del electroscopio siguen siendo atraídas por las (—) del inductor, y se mantienen en la esferita.

4) Alejamos el inductor. Ahora las hojuelas se abren, como si hubieran recibido una carga eléctrica. Y, en verdad, han recibido cargas: las (+) del electroscopio, que el inducido había separado y que mantenía en la esferita, por la ley de la atracción entre cargas de distinto nombre.

Y así, el electroscopio ha quedado cargado con cargas positivas, sin que el cuerpo electrizado lo haya tocado.

Obsérvese que cuando se carga a un cuerpo por contacto, las cargas que adquiere son del mismo signo de quien lo electrizó, mien-



Conductor cargado por contacto y por inducción; el mismo número de cargas. (Siempre que el inducido rodee completamente al inductor.)

tras que si se lo carga por inducción, *las cargas son del signo opuesto a las del inductor.*

Si una vez cargado el electroscopio por inducción acercamos nuevamente el inductor, las hojuelas caen, pues las cargas que poseía han sido llevadas nuevamente hacia la esferita del electroscopio.

¿Cuánta carga se produce en el inducido?

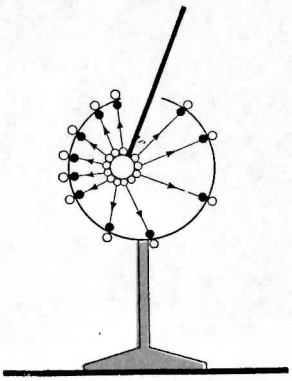
Cuando se carga un electroscopio por inducción, la cantidad de carga producida por inducción varía de acuerdo con la carga del inductor y con la distancia del inductor al inducido. Pero hay un caso especial, en que la carga inducida es igual a la carga inductora, como veremos en seguida:

1) Electrizamos el planito de prueba con cierta carga y lo introducimos en la esfera metálica hueca, poniéndolo en contacto con la superficie interior. Como en la superficie interior de un conductor no puede haber cargas, todas las que llevaba el plano de prueba pasan al exterior de la esfera. Las hojuelas del electroscopio conectado a la esfera se separan, formando entre sí un cierto ángulo, que medimos, y que nos da un índice del número de cargas de la esfera.

2) Volvemos a electrizar el plano de prueba con el mismo número de cargas del caso anterior (esto se puede lograr, por ejemplo, apoyando el plano en uno de los polos de una máquina electros-

tática y dando en ambos casos el mismo número de vueltas a la manija de la máquina).

Se introduce el planito de prueba dentro de la esfera, pero sin que la toque, para que la esfera hueca quede cargada por inducción. Se observará que las hojuelas del electroscopio se separan, formando un ángulo igual al del caso anterior, lo que significa que:



Por qué se producen tantas cargas inducidas como las que tiene el inductor.

Cuando el cuerpo inducido rodea completamente al inductor, la carga inducida es igual y de signo contrario a la carga inductora.

Esto sólo se cumple cuando el inducido rodea completamente al inductor.

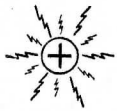
Como consecuencia interesante de esta propiedad de las cargas inducidas, es posible *medir la carga que tiene un aislador*, lo que no es posible por contacto, pues los aisladores cargados sólo ceden la carga que está colocada en el punto de contacto con el electroscopio.

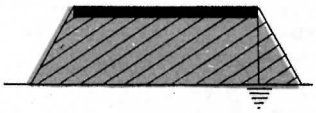
Miguel Faraday demostró la igualdad entre la carga inducida y la inductora cuando el inducido rodea completamente al inductor. Para ello le bastó pensar que como toda línea de fuerza se origina en una carga positiva y termina en una negativa, cuando el inductor está dentro del inducido, cada línea de fuerza que sale de una carga de aquél debe terminar en otra carga de signo opuesto, que no puede menos que estar sobre éste. El caso es distinto cuando el inductor está fuera del inducido, pues entonces algunas líneas de fuerza pueden ir a parar a cargas situadas sobre otros cuerpos.

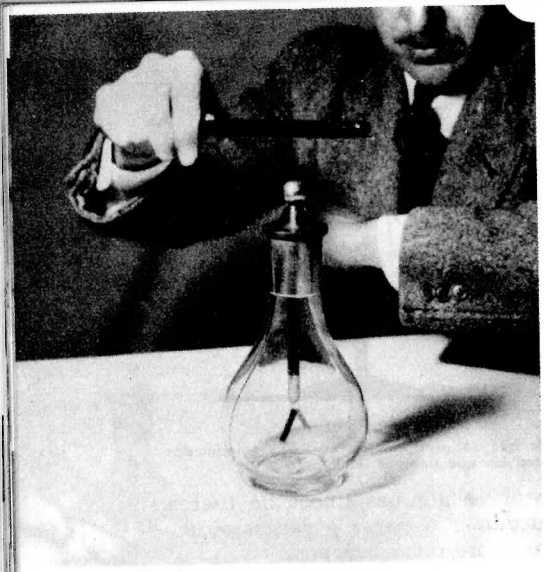
Las pantallas electrostáticas

En esta época de los aparatos radiotelefónicos, todo el mundo ha oído hablar alguna vez de las pan-

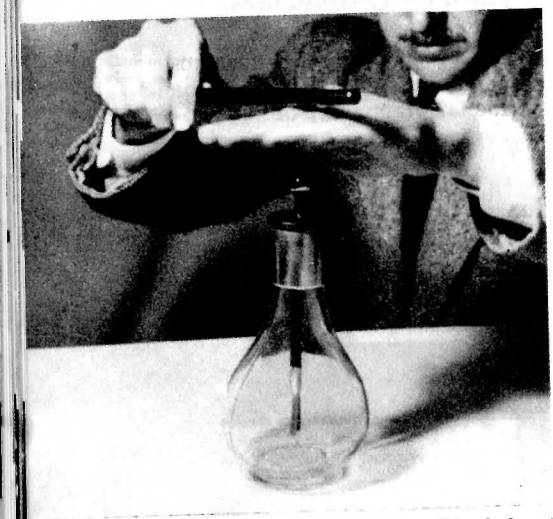
Hay pantallas eléctricas, análogas a las destinadas a la luz.







La mano sirve de pantalla electrostática.



tallas electrostáticas. Si delante de un foco luminoso se coloca una pantalla opaca, ésta impide la llegada de la luz. ¿Será posible construir pantallas que impidan la influencia eléctrica? Sí, y fácilmente, pues la pantalla puede ser nuestra mano. Si se acerca una barra electrizada a la esferita de un electroscopio, las hojuelas divergen, porque se han cargado por inducción. Pero basta interponer la mano, como muestran las fotografías, para que las hojuelas vuelvan a caer, como si la mano hiciera "sombra" sobre el electroscopio.

La explicación es sencilla: si la barra está cargada negativamente, por ejemplo, atrae hacia la esferita las cargas (+) del electroscopio, y rechaza hacia las hojuelas las cargas (−). Pero al interponer la mano, es ésta la que se carga por inducción; pero como el cuerpo humano es conductor, las cargas (−) de la mano van a tierra, y frente al electroscopio ya no hay cargas que ejerzan influencia eléctrica.

De acuerdo con esta experiencia, las pantallas electrostáticas deben ser cuerpos conductores y estar conectadas a tierra. En la figura se representa el funcionamiento de la pantalla, explicado mediante las líneas de fuerza del campo eléctrico generado por el inductor.

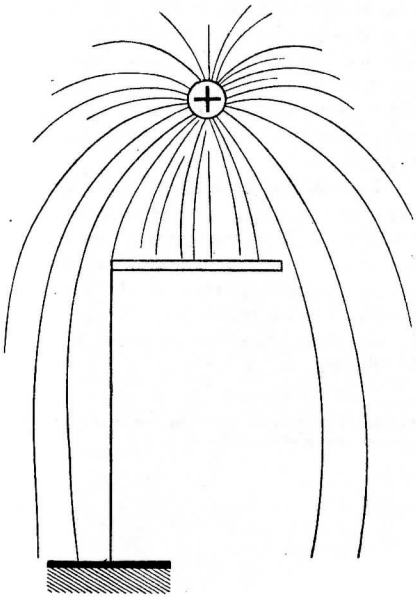
CAJA DE FARADAY. La caja de Faraday es una pantalla que envuelve totalmente el aparato que se quiere mantener fuera de la influencia eléctrica. No es necesario que las paredes de esta caja sean placas metálicas, pues basta con un enrejado, alambre tejido, por ejemplo, como el que muestra la fotografía de página siguiente.

EL PARARRAYOS. Es una aplicación del poder de las puntas y de los fenómenos de inducción. Su inventor fue Benjamín Franklin, norteamericano. Mucha gente ha-

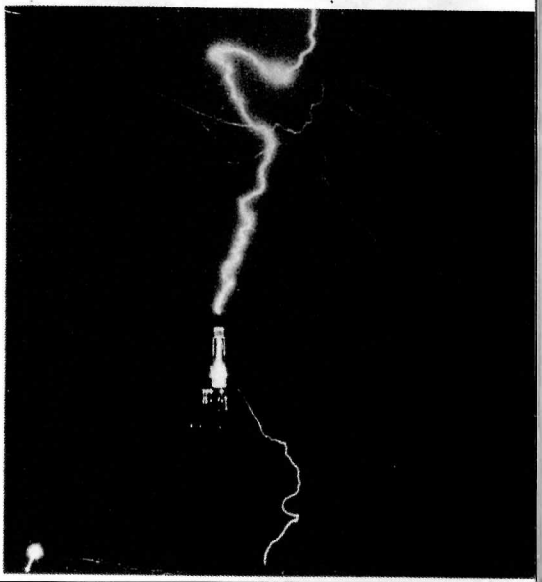
Una jaula de Faraday destinada a impedir que los fenómenos eléctricos que se produzcan en el exterior provoquen perturbaciones dentro.

bía ya imaginado que el rayo podría ser una chispa eléctrica, del mismo tipo que las que se producían en los laboratorios, pero de un poder tremendo. Para confirmar esta teoría, Franklin, con la ayuda de su hijo, hizo una serie de experiencias con una cometa, que remontaba los días de tormenta. Los dos se divertían bastante, y los resultados confirmaron la teoría: las nubes tormentosas llevaban grandes cantidades de electricidad. Entonces Franklin instaló en su casa una barra metálica muy alta, que estaba unida con un alambre

Debajo de la pantalla, unida a tierra, no hay líneas de fuerza.

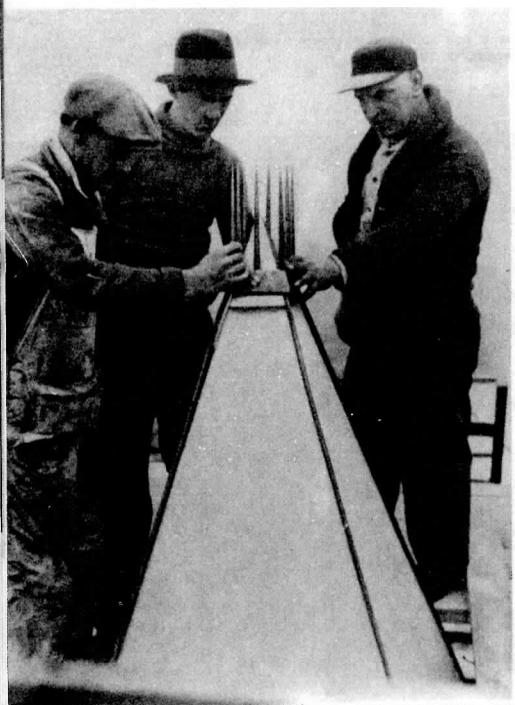


Un rayo cae sobre un rascacielos protegido por un moderno pararrayos.



Idea del pararrayos.

a un juego de campanas; cuando las nubes estaban suficientemente cargadas, atraían las cargas contrarias de la superficie terrestre, que se concentraban en el asta, el alambre y las campanas, sobre todo en el asta, y finalmente escapaban por la punta. Las campanas sonaban con gran estrépito.



Las experiencias con pararrayos se multiplicaron, sin que la gente supiese los peligros a que se exponía. El 6 de agosto de 1753, un físico de San Petersburgo, llamado Richmann, murió a consecuencia de una poderosa descarga eléctrica, en un día de tormenta, mientras experimentaba con un pararrayos.

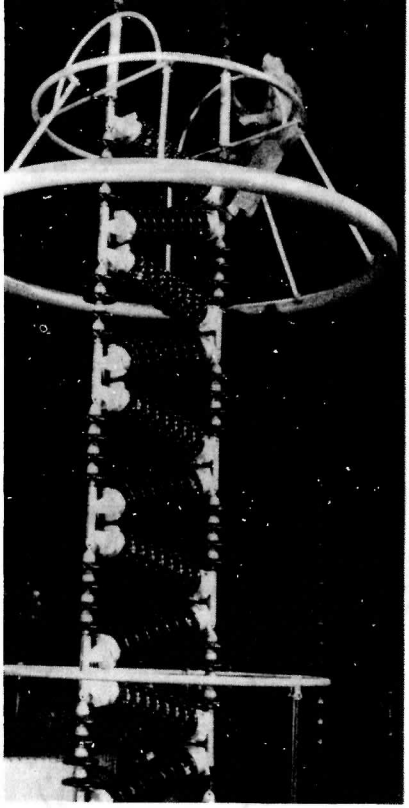
Actualmente, todos los edificios importantes poseen pararrayos en su parte superior. El asta metálica, terminada en varias puntas, debe estar muy bien conectada a tierra, para que las cargas pasen sin dañar. Además el pararrayos se complementa con un enrejado metálico –que en las construcciones de hormigón armado está formado por las vigas de hierro del hormigón– que constituye una jaula de Faraday que protege el interior del edificio de las perturbaciones eléctricas provocadas por la descarga.

En los últimos años, los físicos han estudiado sistemáticamente los rayos y así han llegado a comprobar que hay dos clases de rayos, caliente y frío. El rayo caliente es una descarga de larga duración (unos 0,25 de segundo), de modo que puede causar incendios y fundir los metales. El rayo frío, en cambio, dura solamente unos pocos microsegundos y es acompañado generalmente, de un retumbante trueno.

Uno de los resultados más interesantes de las investigaciones modernas fue comprobar que el 95 % de los rayos son descargas eléctricas que parten de la Tierra hacia la nube y sólo el 5 % restante son descargas de la nube hacia la Tierra.

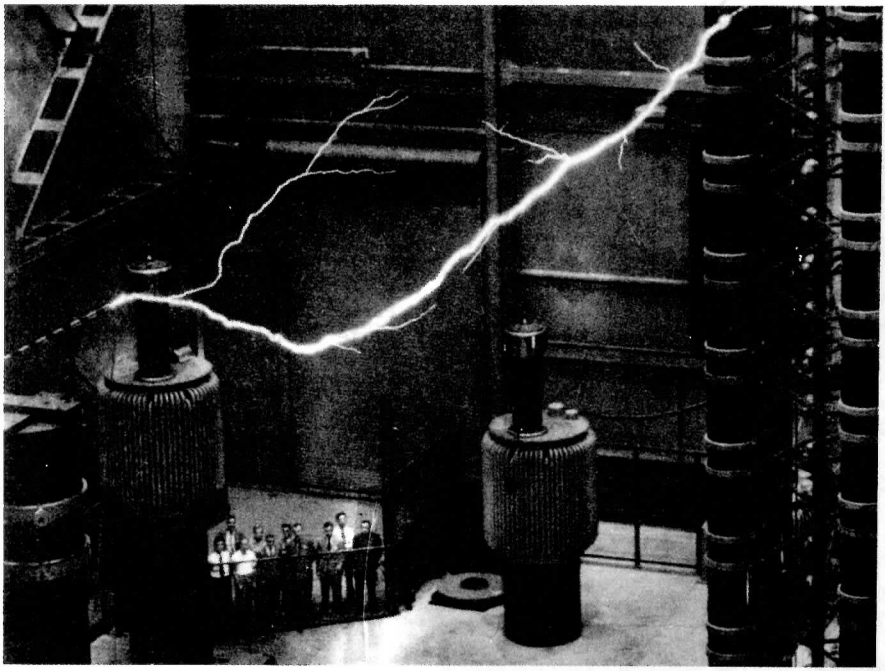
Puntas de platino del pararrayos que protege el monumento a Wáshington.

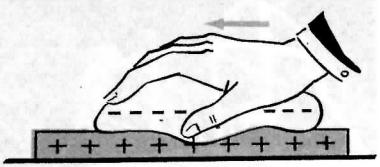
Moderno pararrayos.



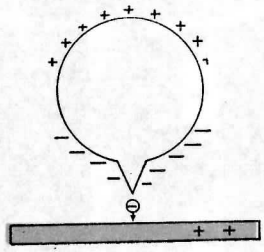
Durante una tormenta eléctrica no se debe nadar, porque uno de los lugares más peligrosos es el agua, dentro o sobre ella. Tampoco se debe quedar debajo de un árbol; a simple vista parecería que un árbol es una especie de pararrayos natural, pero lo cierto es que si bien puede conducir la descarga, no puede resistir una gran descarga, por lo que una persona parada debajo de un árbol puede ser herida por ramas desprendidas, o bien alcanzada por una descarga lateral proveniente del tronco. Una de las supersticiones más difundidas sobre el rayo es que éste no cae dos veces sobre el mismo lugar. Esta creencia es absolutamente falsa: en un año el Empire State Building de Nueva York –el rascacielos más alto del mundo– fue alcanzado 50 veces.

Un rayo de 15 millones de volts provocado en el laboratorio de alta tensión de General Electric.

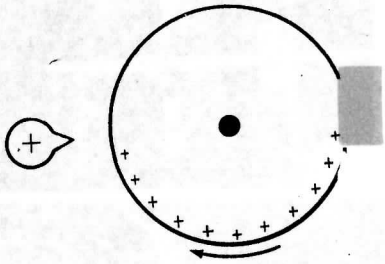




Producción de las cargas.



Recolección de las cargas.



Idea de la máquina electrostática.

Las máquinas electrostáticas

Durante el siglo XVIII, la electricidad constituyó uno de los pasatiempos predilectos entre la gente pudiente y la nobleza, y se amenizaban las tertulias con experiencias que maravillaban a los más profanos. Con la invención de las llamadas "máquinas electrostáticas", productoras de grandes cantidades de electricidad, lo que en un principio constituían fenómenos en pequeña escala, se transformaron en experiencias violentas. Veamos el fundamento de una máquina electrostática:

1) *Producción de las cargas.* Se frota un disco de vidrio, que se carga positivamente; el paño se carga negativamente.

2) *Recolección de las cargas.* El vidrio es un mal conductor, de modo que las cargas se quedan en el lugar en que fueron originadas. Es necesario, pues, recolectar todas las cargas producidas. La experiencia ha enseñado que es mejor hacerlo sin tocar el disco: se provee de una punta a la esfera donde se quieren recoger las cargas, y esa punta se coloca cerca del disco de vidrio. Por inducción, las cargas negativas de la esfera van hacia la punta, y de ahí saltan al disco, neutralizando cargas positivas. Por otra parte, en la esfera quedan en exceso tantas cargas positivas como negativas saltaron, de modo que todo sucede como si las cargas positivas del vidrio pasaran a la esfera.

3) *Motorización.* Es necesario ahora motorizar la producción y recolección. Se mantiene fija la esfera y se hace girar el disco, de modo que toda su superficie (por lo menos la zona periférica) vaya pasando frente a la punta de la esfera. Se logra así "recoger" gran parte de la carga generada en el disco.

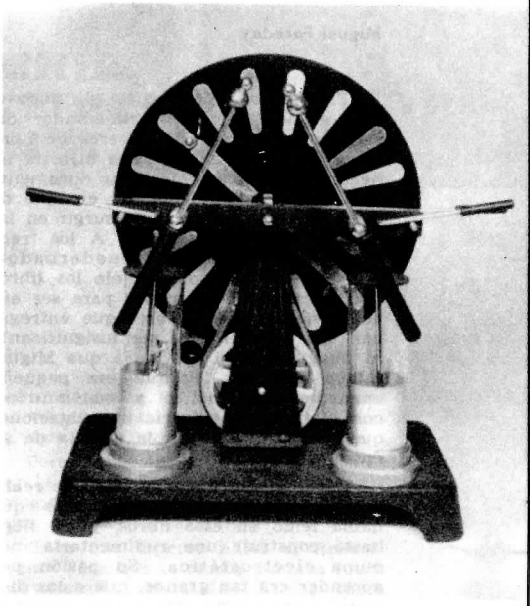
Como simultáneamente se producen electricidades de los dos signos, positivas en el vidrio y negativas en el material que lo frota, también se recogen estas últimas

en otra esfera. Ambas esferas, positiva y negativa, constituyen los polos de la máquina electrostática.

EL ACELERADOR DE VAN DER GRAAF. El empleo de las máquinas electrostáticas estuvo limitado a los laboratorios de enseñanza, hasta que en los últimos años resurgieron con motivo de las investigaciones atómicas. Uno de los primeros bombarderos de átomos es el de van der Graaf que no es sino una máquina electrostática.

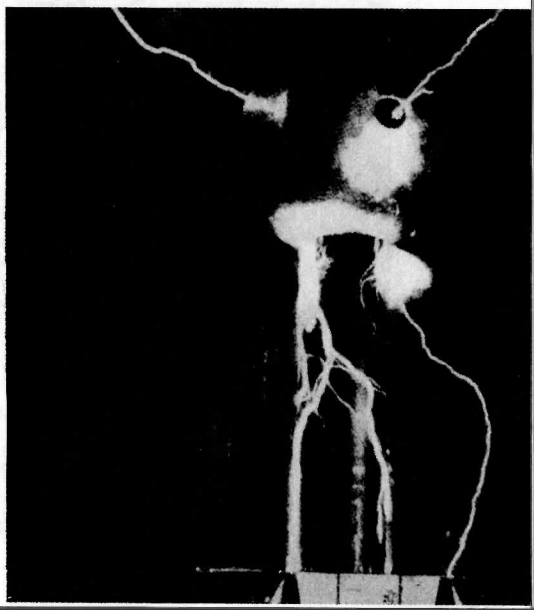
Si en el interior de una esfera hueca se coloca una carga (tocando la esfera), ésta pasa a la superficie exterior, y la superficie interior queda descargada y, por decirlo así, ávida de nuevas cargas. Van der Graaf pensó que utilizando esta propiedad se podría obtener una enorme cantidad de carga sobre la superficie exterior. En lugar de llevar repetidamente un objeto cargado al interior de la esfera hueca, imaginó un dispositivo para motorizar la llegada de cargas: una correa sinfín, de seda (aisladora), sería la encargada de llevar las cargas hasta el interior de la esfera y allí entregarlas.

Así se acumulan en la esfera cantidades extraordinariamente grandes de electricidad del signo que se desee. Si se coloca una carga eléctrica de signo contrario cerca de ella, será rechazada con una fuerza enorme, y adquirirá así velocidades del orden de los 1 000 a 10 000 km/s, que es precisamente lo que se pretende para bombardear con gran energía, materiales que se colocan en el paso de las cargas eléctricas de tal modo aceleradas, como si fueran (y en realidad lo son) el blanco de esos proyectiles atómicos.



Una máquina electrostática: la de la Whimshurst.

Una máquina electrostática destinada a la investigación atómica: el acelerador de van der Graaf.

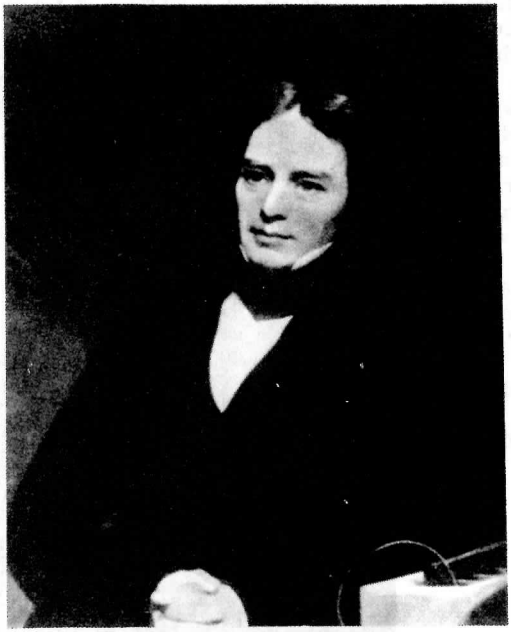


Miguel Faraday

Este genial físico inglés –sin duda el más grande físico experimentador del siglo XIX– nació en 1791, cerca de Londres, y murió en 1867. Era hijo de un herrero, y tuvo que trabajar duramente toda su infancia, siendo un ejemplo de cómo el genio es capaz de surgir en las condiciones más adversas. A los trece años trabajaba como encuadernador, pero en los ratos libres leía los libros que llegaban a sus manos para ser encuadernados. Los señores que entregaban sus libros a este ser insignificante ni imaginaban el destino a que Miguel estaba llamado. Porque ese pequeño encuadernador, pálido y mal nutrido, con el tiempo realizaría investigaciones que revolucionarían la ciencia de su época.

Desde chico, Faraday trató de realizar algunas de las experiencias que había leído en esos libros, y así llegó hasta construir una rudimentaria máquina electrostática. Su pasión por aprender era tan grande, que a los diecinueve años pudo asistir a las lecciones nocturnas que sobre física dictaba Tatum, pagando estas clases con dinero que le facilitó su hermano. En 1812 asistió con gran emoción a unas clases de sir Humphrey Davy, el famoso químico de la Sociedad Real, mientras trabajaba en Londres en un taller de encuadernación. Pero Faraday ardía en deseos de dedicarse completamente a la ciencia, pues sentía que allí estaba su destino; entonces su entusiasmo juvenil le inspiró una idea audaz: envió al famoso Davy los apuntes que había tomado en clase, muestra de su entusiasmo y su esfuerzo, le exponía sus deseos y le solicitaba ayuda. Es de imaginar con qué ansiedad el joven Faraday habrá esperado la respuesta del famoso sabio. ¿Quién era él, habrá pensado Faraday, para dirigirse a un sabio conocido mundialmente por sus trabajos? ¡Un pobre obrero, cuya ciencia se reducía a lecturas realizadas durante la noche, en libros que caían por casualidad en sus manos!

Pero sir H. Davy, el sabio de renombre mundial, se dio cuenta que ese joven desconocido estaba poseído de una fuerza superior, y que quizá llegaría muy lejos. Y nombró ayudante suyo a Miguel; este hecho, capital en la vida de Faraday, sucedió en 1813. Faraday comenzó a trabajar y a producir inmediatamente, y pronto sus investigaciones fueron conocidas en todo el mundo científico. Sus contribuciones al conocimiento de la electricidad y el magnetismo han sido muchas y de la mayor importancia: electrólisis, inducción magnética, y por sobre todas las cosas, la idea más genial de toda la física del siglo XIX: el campo electromagnético, cuya importancia ha aumentado con el tiempo.



14 MATERIA, ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Un poco de historia

Desde la antigüedad más remota, el hombre está empeñado en responder a esta pregunta: ¿Cómo está constituida la materia?

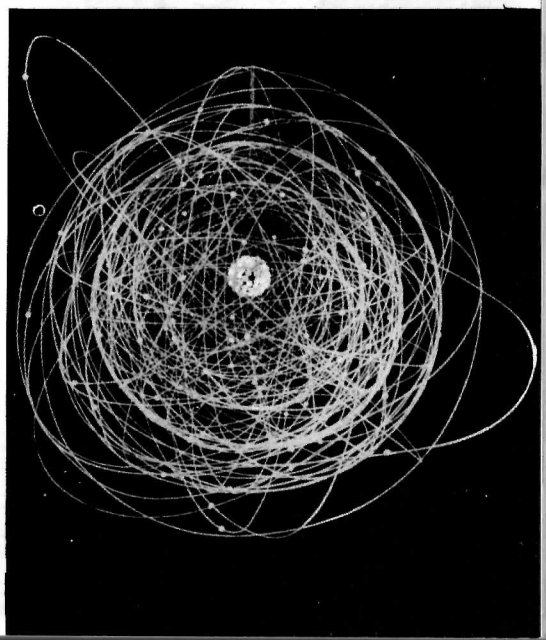
Durante la época de los griegos dos tendencias filosóficas opuestas trataron de resolver la cuestión. Una afirmaba que la materia se puede dividir indefinidamente; que siempre existe la posibilidad, por lo menos teóricamente, de partir un trozo de materia por minúsculo que sea. La otra sostenía que la materia no se puede dividir indefinidamente, que se llegaría a un límite: la partícula más pequeña de materia, a la cual se llamó *átomo*, palabra que en griego quiere decir *indivisible*. Dentro de esta última corriente se hallaban el filósofo Leucipo, que vivió en el siglo v antes de Cristo, y su discípulo Demócrito. Sus ideas sobre el átomo difieren fundamentalmente de las actuales, pero tienen el indudable mérito de haber arrojado la simiente de una teoría desarrollada, y ampliamente confirmada por la experiencia, más de 2 000 años después.

Para Leucipo y Demócrito, los átomos eran como bolitas macizas, cuyos principales atributos eran la *eternidad* y la *indivisibilidad*. Decían: "Las únicas cosas existentes son los átomos y el espacio vacío. Los átomos son infinitos en número, e infinitamente variados en sus formas; chocan entre sí, y las traslaciones y rotaciones así provocadas son el comienzo de los mundos. Las variedades de todas las cosas dependen de las variedades de sus átomos, en número, tamaño y agregación".

Pero estas ideas fueron eclipsadas por la extraordinaria autoridad de filósofos de la talla de Platón y de Aristóteles, que las rechazaron.

Hubo que esperar hasta el Renacimiento para que la teoría atómica fuera nuevamente discutida. Sabios como Newton, Boyle y Huygens se inclinaban a aceptarla, pero comenzaba la época

Un modelo de átomo.



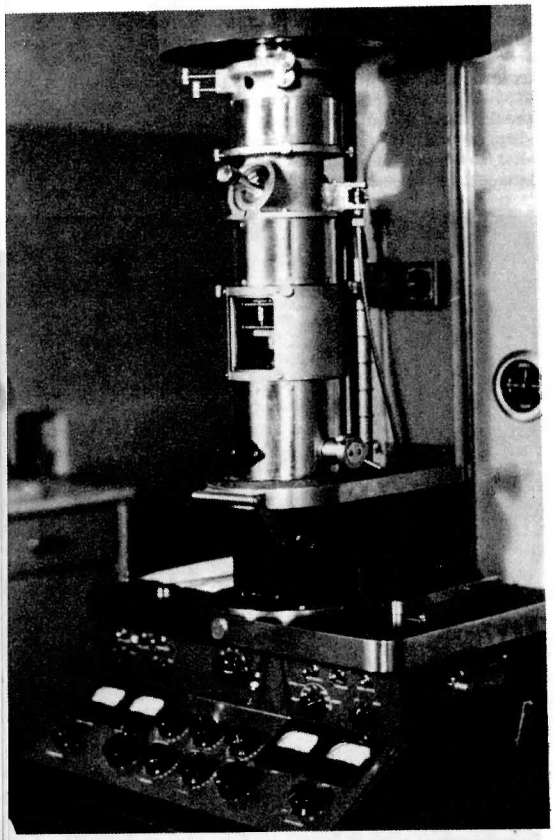
de la física experimental, y para aceptar una teoría, era necesario que fuese comprobada por experiencias.

Fue John Dalton quien dio las primeras pruebas experimentales de la existencia de los átomos. Estudiando las leyes que cumplen los gases al combinarse entre sí, llegó a la conclusión de que sólo eran explicables si se admitía que la materia estaba compuesta por átomos. Enunció entonces su teoría, que, con algunas modificaciones, se vio pronto confirmada por cuantas experiencias se realizaron.

En el siglo pasado, Dimitri Mendeleieff descubrió que todos los elementos químicos están vinculados entre sí por relaciones que no dejan lugar a dudas sobre la constitución atómica de la materia, y esas relaciones son tan precisas, que permitieron predecir la existencia de nuevos elementos químicos y sus propiedades físicas y químicas. Cuando se descubrieron esos nuevos elementos previstos por la teoría atómica, se comprobó que, en cada caso, las relaciones de Mendeleieff se cumplieron casi al pie de la letra.

Hoy se tiene ya la evidencia del átomo. No es, como veremos, el átomo macizo e indivisible de Leucipo, sino todo lo contrario: casi totalmente vacío, y es divisible (lo que justificaría que no se lo llamara más *átomo*). Se parece extraordinariamente a un pequeño sistema planetario.

Microscopio electrónico.



¡Cuál es el tamaño de un átomo!

El físico Carl Stoermer dice lo siguiente:

"Si se quiere concebir la pequeñez del mundo atómico, basta imaginar qué cambios sobrevendrían si todos los objetos familiares se agrandaran en la misma relación, hasta que los átomos se hicieran visibles.

Consideremos primero un agrandamiento de 100 veces. Los hombres serían gigantes, de una altura igual a la mitad de la torre Eiffel, y las avispas serían bestias terribles, grandes como toros.

Supongamos ahora que este mundo sufre un nuevo agrandamiento de 100 veces. Los hombres se convertirían en montañas gigantescas de 15 ó 20 km; la avispa tendría varios centenares de metros; un cabello tendría 1 metro de espesor, y los microbios serían de 1 cm de largo.

Aumentemos 100 veces más. El cabello tendría un espesor de 100 metros, los microbios serían de 1 metro, pero los átomos, todavía minúsculos, no alcanzarían al décimo de milímetro.

Otra dilatación de 100 veces. El átomo de hidrógeno se hace por fin fácilmente perceptible, pero al mismo tiempo el grueso de un cabello alcanza a 10 km, los microbios son monstruos de 100 metros de largo, y una bola de billar ha adquirido el tamaño de la Tierra."

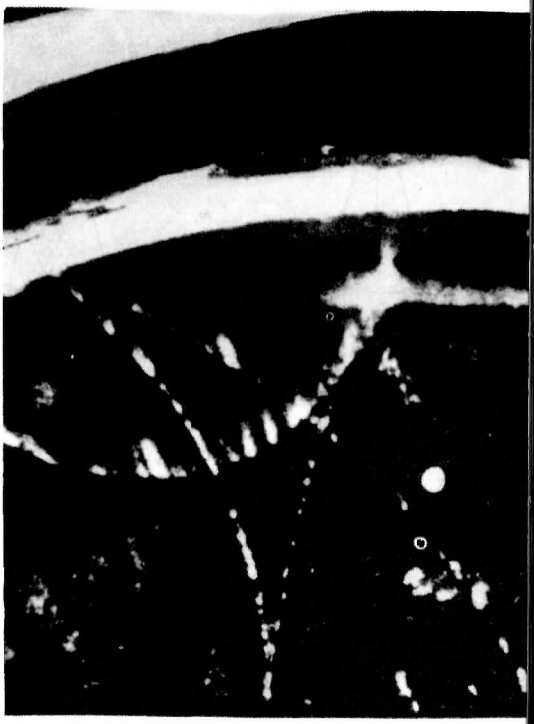
Y sin embargo, el hombre ha sido capaz de medir el diámetro de un átomo y su masa; y no sólo eso: ¡ha sido capaz de explorar su interior y ha descubierto, allí todo un universo planetario, con un *sol* infinitamente más pequeño que un átomo! Y más aún: ¡exploró el interior de ese sol central!

El electrón

A mediados del siglo pasado, ciertas investigaciones sobre la descomposición química provocada por la corriente eléctrica llevaron a una conclusión extraña: la electricidad no era un fluido uniforme y continuo, sino que, por lo contrario, debía estar compuesta de granitos, de modo que una corriente eléctrica sería algo así como un chorro de arena finísima. A esos granitos de electricidad se los llamó *electrones*, y *todas las experiencias indicaban que en los átomos debía haber electrones.* Resultaba así que el átomo no era indivisible, y que alguna función debían desempeñar los electrones en su complicada estructura interna. Se entrelazan así dos capítulos igualmente apasionantes de la investigación de la naturaleza: la estructura de la materia y la estructura de la electricidad.

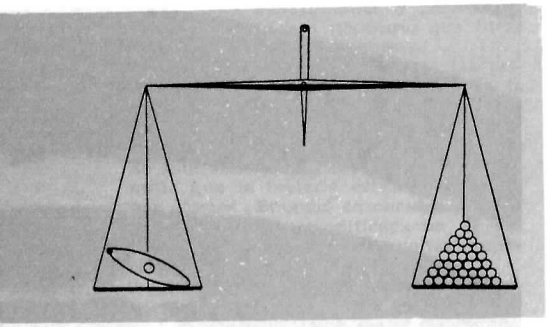
Miguel Faraday, al estudiar los efectos químicos de la corriente eléctrica, hizo descubrimientos muy importantes, que contribuyeron decisivamente a confirmar la existencia del electrón. Sus investigaciones llevaron a la conclusión de que la corriente eléctrica no era otra cosa que un pasaje de electrones por un conductor. Esta concepción de la corriente eléctrica pareció tan extraña en aquella época, que sólo se la aceptó cuando, a fines del siglo XIX, algunas experiencias casi "hicieron ver" los electrones.

Esas experiencias fueron realizadas principalmente entre los años 1869 y 1897, por Hittorf,



Creación de un par de electrones, uno positivo y uno negativo.

Trayectoria de un electrón positivo.



La masa del átomo de hidrógeno es 1 840 veces mayor que la del electrón.

Goldstein, Crookes, Hertz, Perrin y otros. Finalmente, en 1897 el físico inglés J. J. Thompson calculó la masa de un electrón, y encontró que era unas 2 000 veces menor que la masa de un átomo de hidrógeno, el átomo más liviano que existe en la Naturaleza.

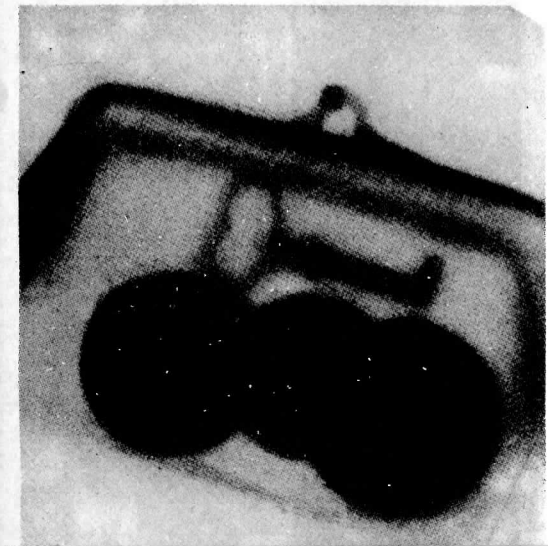
Además, sus experiencias mostraron que los electrones eran atraídos por cuerpos cargados con electricidad positiva; luego, los electrones eran corpúsculos de electricidad negativa.

Actualmente se han hecho mediciones mucho más precisas que en la época de Thompson, y se ha encontrado que la masa del electrón es 1840 veces menor que la masa de un átomo de hidrógeno.

Las experiencias, pues, permiten afirmar que, así como la materia está formada por átomos, la electricidad está formada por electrones.

¿Y cuántos electrones pasan, por segundo, por el cable conectado a un aparato común, a una plancha, por ejemplo? Admitiendo que funciona con una corriente de 1 ampere, por segundo pasan $6 \cdot 10^{18}$ electrones. Esto da una idea de la pequeñez de la carga eléctrica del electrón, y explica que durante tanto tiempo se haya pensado que la corriente eléctrica era un fluido continuo y no de carácter granular.

Primitiva radiografía obtenida empleando radio.



El descubrimiento de la radiactividad

El avance más importante hacia el conocimiento del interior del átomo se produjo cuando se descubrieron y estudiaron los fenómenos radiactivos.

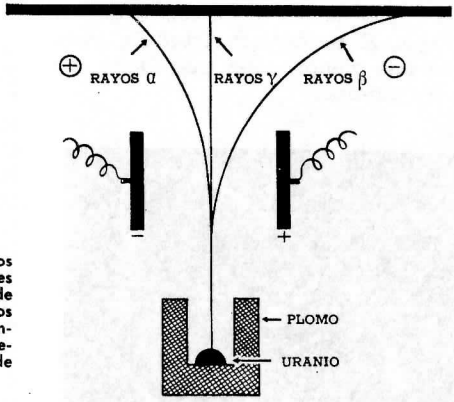
Hacia fines del siglo pasado, Henri Becquerel, profesor de la Sorbona, estudiaba la fluorescencia de sustancias, empleando algunas a base de uranio. En cierta ocasión, mientras realizaba una experiencia, suspendió su trabajo, envolvió cuidadosamente en papel negro las placas fotográficas que

estaba empleando, y las guardó en un cajón, junto con la sustancia fluorescente motivo de su estudio.

Cuando se dispuso a continuar su trabajo, se encontró con la sorpresa de que la placa guardada con tanto cuidado estaba velada, como si hubiera sido utilizada o expuesta a la luz anteriormente, cosa que no había sucedido. ¿Qué podía haber pasado? ¿Qué radiación misteriosa habría impresionado la placa?

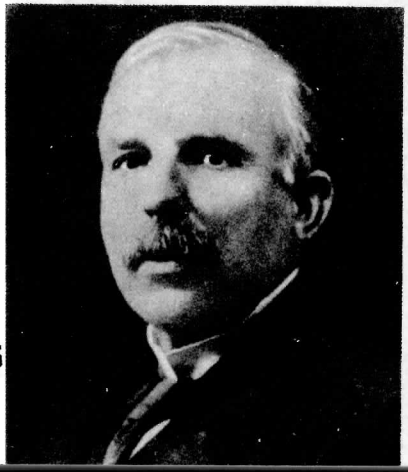
Naturalmente, Becquerel sospechó que se trataba de un efecto

Henri Becquerel.



Las tres radiaciones radiactivas. Los rayos alfa son núcleos de helio, es decir, tienen carga doble que la de un electrón pero positiva. Los rayos beta son electrones. Los rayos gamma son ondas electromagnéticas semejantes a las luminosas, pero de longitud de onda mucho menor.

Lord Rutherford.



de las sustancias fluorescentes, de modo que comenzó a estudiar la influencia que ejercían sobre placas envueltas en papel negro. Pronto descubrió que sólo velaban las placas aquellas sustancias en que se hallaba presente el uranio. Por lo tanto, el uranio debía emitir alguna clase de radiaciones, desconocidas hasta entonces, que tenían la propiedad de impresionar las placas fotográficas, a tra-

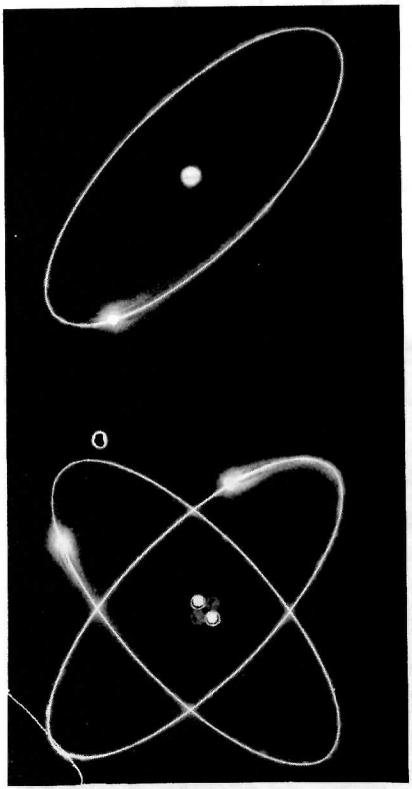
vés de la envoltura de papel negro, que era protectora para la luz común.

En 1899, Rutherford empezó a estudiar sistemáticamente las misteriosas radiaciones emitidas por los minerales de uranio, y llegó a la conclusión de que se trataba de tres radiaciones distintas:

1) Partículas cargadas con electricidad positiva, a las que llamó *rayos alfa.*

2) Partículas cargadas con electricidad negativa, y que resultaron ser electrones, a las que llamó *rayos beta.*

3) Ondas electromagnéticas, del tipo de las de la luz, o de los rayos X, pero de longitud de onda mucho menor, a las que llamó *rayos gamma.*



Materia y electricidad

El interior de los átomos

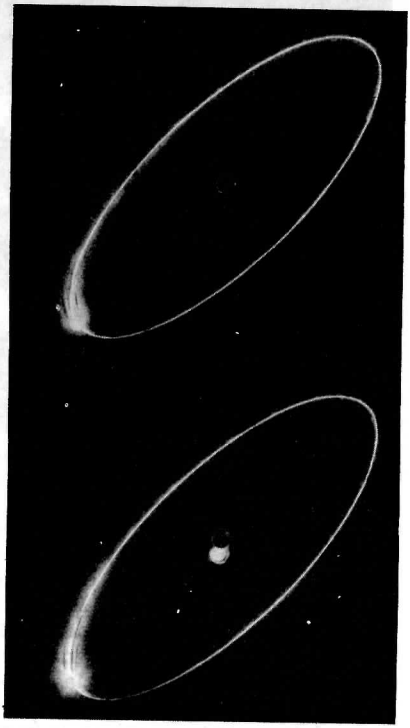
Con los fenómenos radiactivos se tuvo la certeza de que el átomo, por lo menos el de uranio, debía tener una complicada estructura interna, pues de su interior salían espontáneamente cargas eléctricas positivas y negativas, y radiación electromagnética.

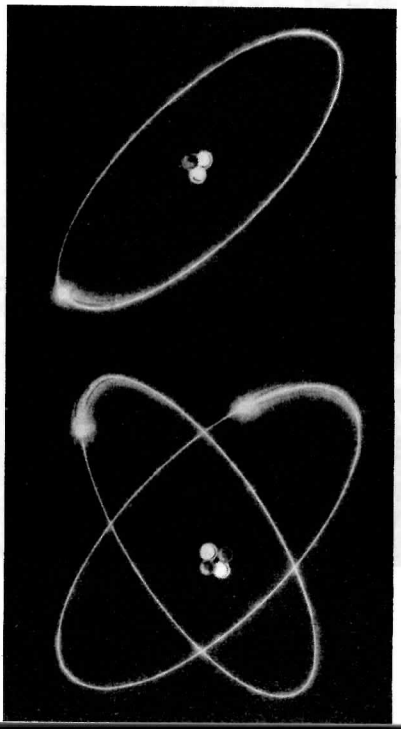
Más adelante se comprobó que los átomos de todos los elementos químicos tienen una estructura semejante a la del uranio, es decir, poseen en su interior cargas eléctricas positivas y negativas. Como la materia, exteriormente, se comporta como eléctricamente neutra, se dedujo que en el interior del átomo las cargas eléctricas positivas son iguales a las cargas eléctricas negativas. Pero, ¿cómo están distribuidas las cargas? ¿Sería el átomo, como lo imaginó y calculó J. J. Thompson, una esfera positiva hueca, con los electrones dentro?

Rutherford halló la solución. Para conocer la distribución de las cargas dentro de un átomo, se le ocurrió bombardear una delgada lámina metálica con los proyectiles alfa emitidos por una sustancia radiactiva. Los átomos que constituyen la materia de la lámina, tienen cargas positivas y negativas, y según sea su distribución, atraerán o rechazarán a las partículas positivas que son los rayos alfa. Calculó previamente qué trayecto-

ria deberían seguir las partículas alfa en cada caso, y luego realizó la experiencia. Como resultado, Rutherford llegó a la conclusión de que un átomo no es una esfera compacta, ni siquiera una esfera hueca, sino algo así *como un minúsculo sistema planetario, en cuyo centro, como un sol, se halla el núcleo, que tiene casi toda la masa del átomo, y cuya carga es positiva. A "gran" distancia del núcleo, comparando ésta con las dimensiones de las partículas, se hallan los electrones –de carga negativa– girando alrededor del núcleo, como si fueran diminutos planetas.*

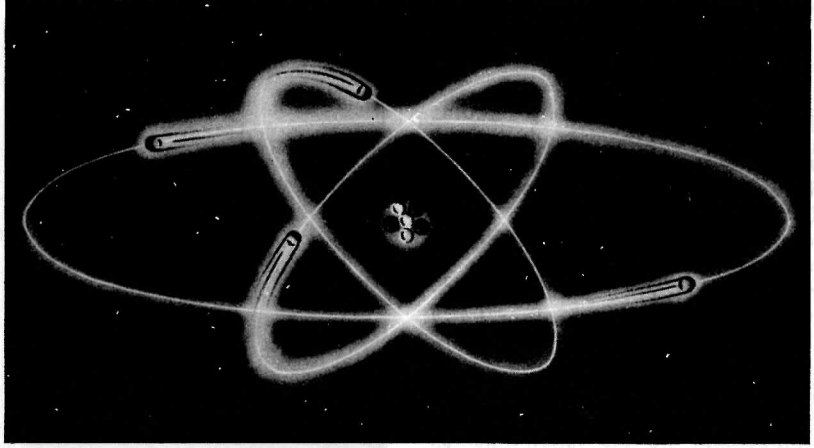
La carga del núcleo es igual en cantidad, y de signo contrario, a la suma de las cargas de todos los electrones planetarios, y por eso el átomo se presenta exteriormente como neutro. Por ser positivo, el núcleo atrae a los electrones, pero la rotación de éstos impide que caigan sobre él.





Las dimensiones del universo atómico

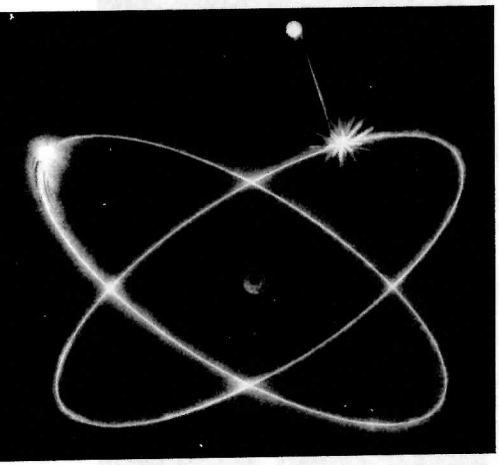
Una molécula es una partícula muy pequeña. Aun en el caso de un gas, en el que están mucho más separadas que en los líquidos y los sólidos, en 1 cm^3 hay $25 \cdot 10^{18}$ moléculas. Cuando se lee un número tan grande, uno no puede concebir bien cuánto es, pero se tendrá una idea si se imagina que si cada uno de los habitantes de la Tierra, trabajando durante 8 horas diarias, contara una molécula por segundo, los habitantes de la Tierra tardarían unos 12 000 años en contar sólo las moléculas contenidas en 1 cm^3 de gas.



El átomo normal de litio tiene tres electrones planetarios.
Si a la órbita exterior llega un cuarto electrón, se tiene un átomo ionizado negativamente.

Pero una molécula es más grande que un átomo; y sin embargo, un átomo resulta ser todo un sistema planetario. Al lado de un átomo, el núcleo tendría el tamaño de un grano de arena. Se deduce de esto, pues, que las distancias del núcleo a los electrones son relativamente enormes, y que el átomo es prácticamente nada más que vacío. Rutherford calculó que en 10 m^3 de cobre sólo hay 1 mm^3 de materia: el resto es vacío. Sir Arthur Eddington calculó que si del cuerpo humano eliminásemos todo el espacio vacío, y apeñuscáramos los núcleos y los electrones hasta que se tocasen, el volumen del cuerpo no sería mayor que el de esas partículas de polvo que se ven flotar en el aire cuando las ilumina un rayo de sol. Estas suposiciones parecen absurdas, pero hay casos en que la materia se encuentra en un estado semejante *.

Ionización por pérdida de un electrón: se tiene un ion positivo.



Cómo es el núcleo

El núcleo tampoco es una partícula simple, sino que está formado por *protones* y *neutrones*. El protón es una partícula cargada positivamente, de carga igual a

* Véase Introducción a la Física, tomo I, pág. 164.

la del electrón, pero de masa 1 840 veces mayor que la del electrón; aproximadamente, 10^{-24} g.

El neutrón tiene la misma masa que el protón, pero no tiene carga eléctrica: es una partícula neutra, y de ahí su nombre.

Un átomo de hidrógeno está constituido por un solo protón como núcleo y un solo electrón que gira a su alrededor. Como la masa del electrón es tan pequeña comparada con la del protón, la masa atómica del hidrógeno * es, prácticamente, la del protón.

Si tomamos la masa de éste (o la del neutrón) como unidad para medir masas atómicas, entonces la masa atómica del hidrógeno es aproximadamente 1.

La masa atómica de un elemento cuyo núcleo tenga, por ejemplo, 10 protones y 20 neutrones, valdrá 30. El uranio 235, famoso por la bomba atómica, debe tener, pues, 235 protones y neutrones; como son 92 los electrones que giran alrededor del núcleo, el número de protones es también 92, porque el átomo es neutro. Por lo tanto, el resto, $235 - 92 = 143$, es el número de neutrones del núcleo de ese átomo.

Los iones

Un átomo puede perder uno o varios de sus electrones planetarios, y en ese caso, como el número de protones es mayor que el de los electrones que han quedado, el átomo queda cargado positivamente, y se lo llama *ion positivo*.

Pero el desequilibrio eléctrico también puede producirse por la incorporación al átomo de uno o más electrones, en cuyo caso se tiene un *ion negativo*.

Casi todos los elementos tienen una tendencia definida a ganar o a perder electrones periféricos. Los metales, por ejemplo, tienden a perderlos, y por eso se los llama *electropositivos*; los no metales, en cambio, tienden a ganarlos, y se los llama *electronegativos*. Por ejemplo: el átomo de cloro tiene tendencia a captar un electrón; cuando lo logra, se forma un ion cloro, electronegativo.

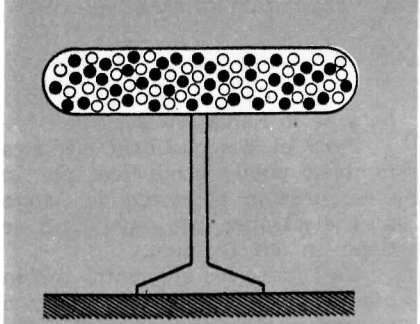
Interpretación moderna de los fenómenos eléctricos

Con la breve síntesis que acabamos de hacer, estamos en condiciones de dar una explicación de los fenómenos electrostáticos que hemos estudiado.

¿Qué ocurre al frotar dos cuerpos?

Si se frota una barra de cobre con seda, el cobre pierde electrones y queda cargado positivamente; la seda, por el contrario, queda cargada negativamente porque ha captado los electrones que perdió el cobre.

* En realidad, la unidad de masa atómica es la 16 ava parte de la masa de un átomo de oxígeno, pero la diferencia es pequeña, pues tomando esta unidad, la masa de un átomo de hidrógeno es de 1,008.



Conductor en estado neutro.

Si la barra es de azufre, como éste es electronegativo, capta electrones cedidos por la seda, y se carga negativamente; la seda queda cargada positivamente.

En todos los casos, los electrones perdidos por un cuerpo son captados por el otro, lo que explica por qué la carga que aparece en uno es igual y de signo contrario a la que aparece en el otro.

Dos advertencias: 1) También se produce intercambio de electrones cuando se frotan dos cuerpos de la misma sustancia. Por ejemplo, si se frotan dos trozos de vidrio, uno más pulido que el otro, el menos pulido capta electrones.

2) Una misma sustancia puede en un caso perder electrones, y en otro ganarlos. Para saber cómo se comportará un cuerpo al ser frotado, es muy útil la tabla triboeléctrica: cada una de las sustancias mencionadas en ella, frotada con una de las que le preceden, se carga negativamente; con una de las que le siguen, se carga positivamente.

1. Piel de conejo.
2. Vidrio.
3. Mica.
4. Lana.
5. Marfil.
6. Piel de gato.
7. Seda.
8. Algodón.

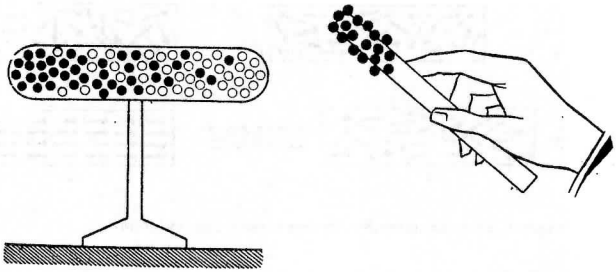
EJEMPLO: Si se frota la mica con vidrio, la mica se carga negativamente; si se la frota con lana, se carga positivamente.

Diferencia entre conductores y aisladores

Cuando se frota una barra de ebonita, capta electrones. Se admite que cada electrón queda incorporado al conjunto de los electrones planetarios de cada átomo, de modo que difícilmente pueden pasar de un lugar a otro.

Lo contrario sucede con los metales, que tienen muchos electrones libres, es decir, que no están formando parte de los electrones planetarios de los átomos. Cuando se frota una barra metálica desprovista de mango aislador, pierde electrones, pero el equilibrio eléctrico se restablece inmediatamente, pues el lugar dejado por los electrones perdidos es ocupado inmediatamente por electrones que llegan a la barra; por ejemplo, a través de la mano que la sostiene. Es evidente, pues, que si se quiere que el equilibrio no se restablezca, es decir, que la barra quede eléctricamente cargada, es necesario impedir la llegada de esos nuevos electrones, aislándola.

La explicación es la misma cuando el metal gana electrones en lugar de perderlos, como, por ejemplo, cuando se lo carga por contacto. Si el metal no está aislado, los electrones entregados se van; entonces, el cuerpo se descarga. Si está aislado, queda un exceso de electrones, y resulta cargado negativamente.



Al acercársele un cuerpo cargado, el conductor se carga por inducción.

Cómo se descargan los cuerpos conectados a tierra

Debemos considerar a la Tierra como un cuerpo conductor, aislado en el espacio y cargado negativamente, capaz de ceder o admitir electrones. Con esta hipótesis se explica que cuando conectamos a tierra un conductor cargado, positiva o negativamente, éste se descargue. Si está cargado positivamente, la tierra entrega electrones hasta que alcanza el equilibrio; si lo está negativamente, los electrones que el cuerpo tiene en exceso pasan a tierra, que siempre admite más electrones.

Inducción

Si a un cuerpo neutro, conductor, se le acerca una carga positiva, los electrones de aquél son atraídos hacia el extremo más cercano a la carga inductora, y por lo tanto, en ese extremo hay carga negativa. El extremo opuesto queda cargado positivamente, por el exceso de iones positivos. Como por cada ion positivo hay un electrón libre, en ambos extremos hay la misma cantidad de electricidad.

Materia y magnetismo

Hemos visto hasta aquí las relaciones entre la materia y la electricidad. Pasemos ahora a considerar las relaciones entre la materia y el magnetismo.

La primera teoría sobre el magnetismo surgió de la experiencia de los imanes cortados. Si el procedimiento de ir cortando los imanes se pudiera seguir indefinidamente, se llegaría hasta las moléculas, que serían así pequeñísimos imanes. Se admite que las moléculas son pequeños imanes; cuando están ordenados, la sustancia está imanada; cuando están desordenados, la sustancia no presenta propiedades magnéticas.

Para comprender cómo se imana y se desimana un cuerpo, pueden realizarse experiencias con agujas magnéticas colocadas dentro de una caja, como indica la figura. Imaginemos que las agujas son las moléculas de una barra de hierro, que está representada por la caja (la flecha de cada aguja representa su polo norte).

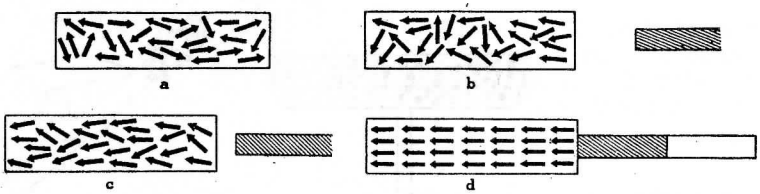
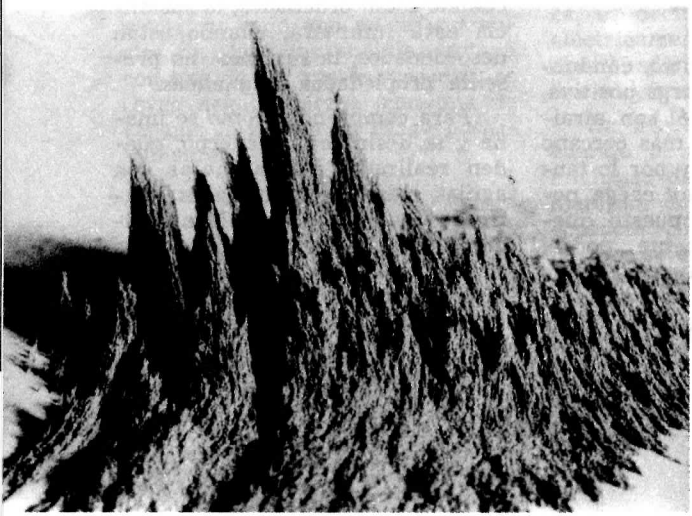


Imagen para comprender la imanación por inducción.

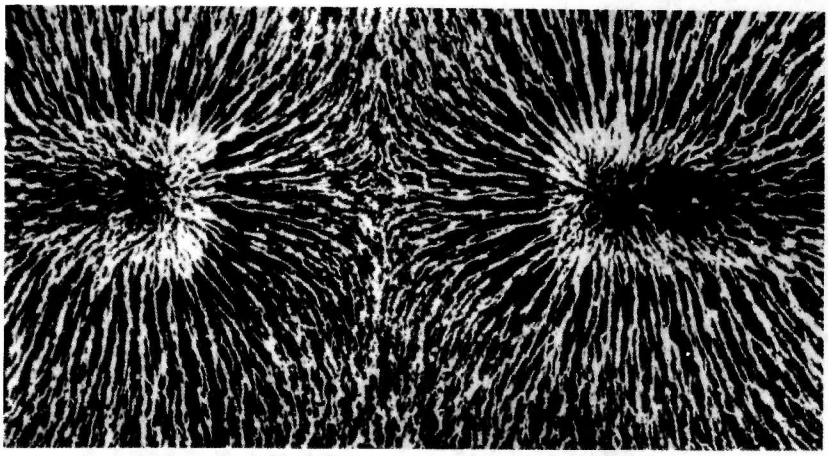
Cuando no hay ninguna influencia externa, las agujas se disponen como muestra la figura *a*: los efectos exteriores de cada polo se compensan entre sí, de modo que la "barra" no presenta propiedades magnéticas, es decir, está desimanada. Si se acerca un imán, se observa que las agujas comienzan a modificar en parte su desorden (figura *b*) y que se van orientando cada vez más a medida que se acerca el inductor (figura *c*). Cuando todas están alineadas, el magnetismo de. la "barra" no puede ser mayor, aunque se traiga un imán inductor más potente, porque se ha llegado a la saturación (figura *d*).

Con esta imagen se puede comprender por qué cuando se está imanando una barra conviene golpearla ligeramente: los golpecitos ayudan a orientarse a los imanes moleculares. También se comprende por qué para imanar por frotamiento una barra se debe pasar el inductor siempre en el mismo sentido: de otra manera, lo que se ordena al pasar el inductor en un sentido, se desordena al pasar en el sentido opuesto.

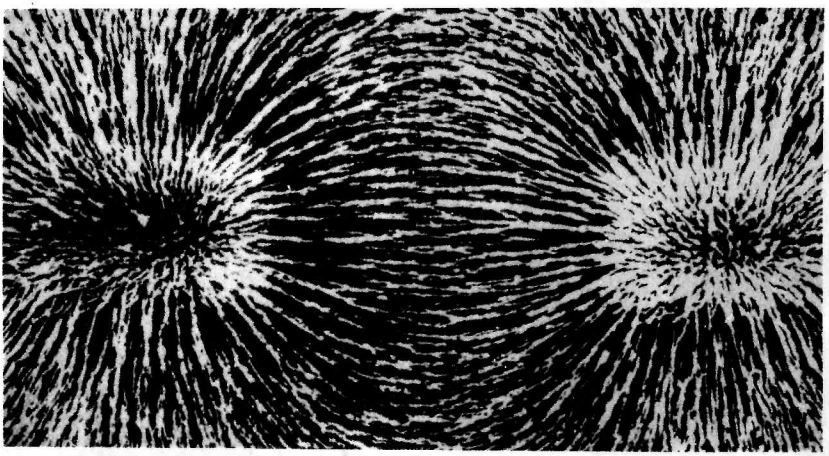
¿Qué ocurre al calentar un imán y llevarlo a la temperatura de Curie? Debido a la violenta agitación que tienen a esa temperatura, las moléculas se desorientan completamente, y la barra pierde sus propiedades magnéticas.



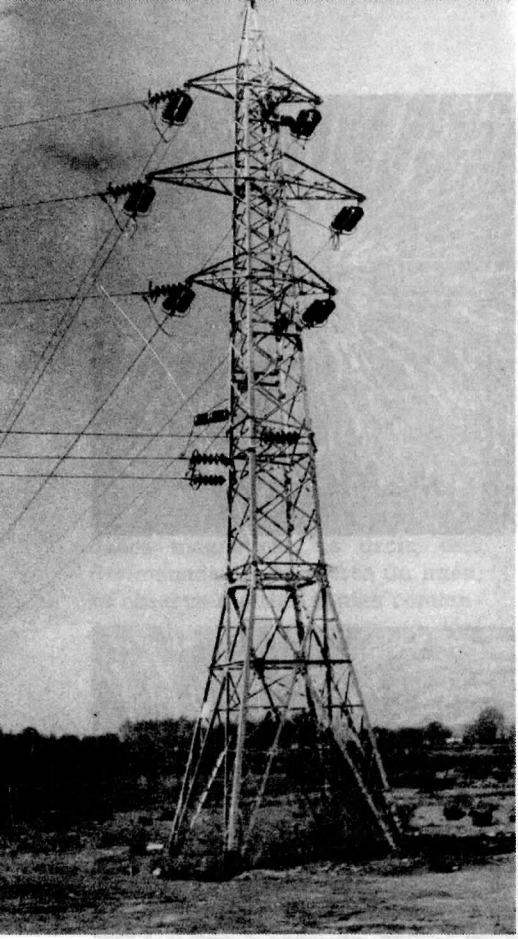
Limaduras de hierro sometidas a vibraciones en una membrana sobre un campo magnético. Las vibraciones hacen que las partículas puedan ubicarse libremente en las líneas de fuerza del campo magnético.



Espectros magnéticos.

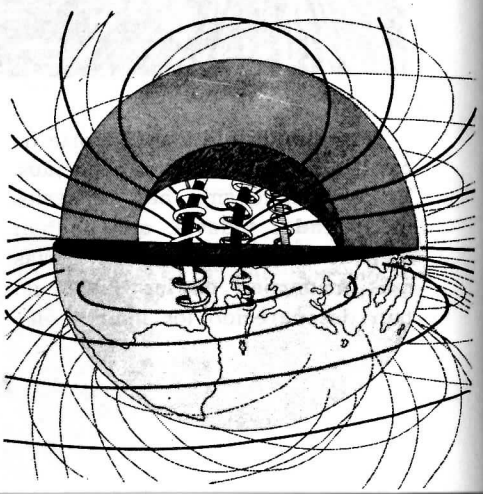


Por supuesto que esta teoría no explica todos los hechos conocidos. En el magnetismo hay misterios inexplicados todavía, que no han logrado desentrañar las teorías más modernas, en las cuales no han desaparecido los imanes elementales, cuya magnetización sería producida por la rotación de los electrones alrededor del núcleo. En estas teorías los imanes elementales no son moléculas imanadas, sino *zonas* o *dominios magnéticos* de estructura aún poco conocida.



V

ENERGÍA Y CORRIENTE ELÉCTRICAS



La energía es la clave del universo físico. Por eso apoyamos todo el peso de los conceptos físicos en la intervención que en ellos tiene la energía. En todos los procesos: mecánicos, caloricos, eléctricos, magnéticos, lo más importante es la energía. Y el poder transformar la energía de una clase en otra es lo que ha transformado la vida del hombre moderno.

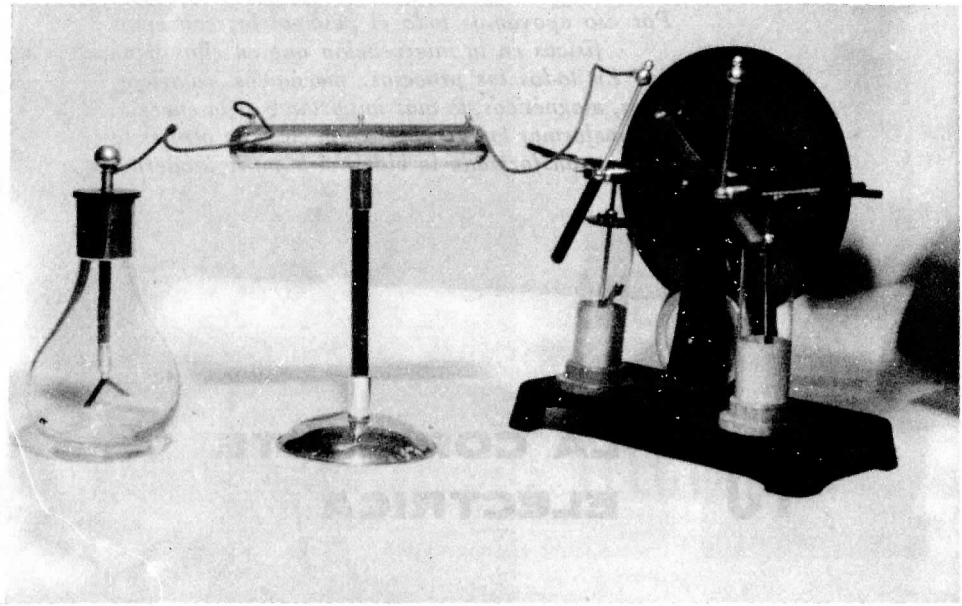
15 LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Corriente de electrones

Si unimos el polo de una máquina electrostática a un conductor descargado y conectado a un electroscopio, observaremos que a medida que se hace funcionar la máquina las hojuelas del electroscopio se van abriendo, lo que indica que a través del alambre que lo conecta con la máquina están llegando cargas eléctricas al conductor.

Cuando por un caño pasa una cantidad de agua durante cierto tiempo, se dice que por él *circula una corriente de agua.* De la misma manera, cuando por un alambre conductor pasa electricidad durante cierto tiempo, diremos que por él *circula una corriente eléctrica.*

¿Cómo se interpreta, electrónicamente, el pasaje de electricidad a través del alambre? Pues diciendo que por él pasan electrones. Pero, de acuerdo con lo dicho en el capítulo anterior, los electrones suministrados (en este caso por la máquina electrostática) no recorren totalmente el alambre conductor (salvo que la corriente durara el tiempo necesario para



ello), sino que todo sucede como si los electrones que pasan de la máquina electrostática al alambre conductor fueran empujando a los electrones libres que hay dentro del alambre, e hicieran salir por el otro extremo un cierto número de electrones igual al que entró. De modo que:

Una corriente eléctrica es un flujo de electrones a través de un conductor.

Esta afirmación se confirma con una notable experiencia realizada por dos físicos norteamericanos: Tolman y Stewart. Se hace girar un trozo de alambre a gran velocidad, y luego se lo detiene bruscamente. Los electrones libres del alambre, por inercia, siguen el movimiento, y si una corriente eléctrica no es más que un flujo de electrones, en el instante de frenar el alambre debe producirse una corriente eléctrica. Y eso fue lo que comprobaron Tolman y Stewart.

¿Para qué sirve la corriente eléctrica?

Todos estamos familiarizados con aparatos que funcionan mediante la energía eléctrica: estufas, calentadores, cocinas, ventiladores, radios, motores, etc. Para su funcionamiento es imprescindible que por ellos pase una corriente eléctrica. No bastaría, por cierto, que por algún medio se produjeran en ellos cargas eléctricas.

Además, la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento se produce en la usina, y desde allí es necesario transportarla a cada aparato. Y el transporte lo hace, precisamente, la propia corriente eléctrica.

Podríamos sintetizar las funciones de la corriente eléctrica diciendo que ella *transmite y hace posible la transformación de la energía eléctrica en otras formas de energía.*

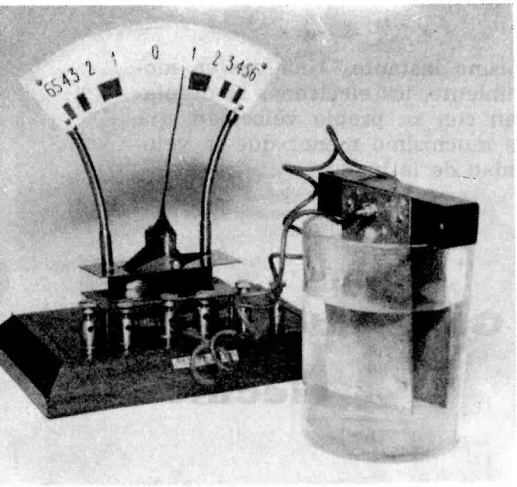
Velocidad de transporte de la energía eléctrica

Por experiencia propia –cuando encendemos la luz eléctrica, cuando ponemos en marcha un ventilador, etc.– todos sabemos que la energía eléctrica se propaga casi instantáneamente. Mediciones especiales enseñan que la energía eléctrica se propaga con la velocidad de la luz: 300 000 km/s. ¿Significa esto que los electrones libres que forman la corriente se mueven a esta enorme velocidad? De ninguna manera; el mecanismo por medio del cual los electrones transportan la energía sería el siguiente: en un conductor hay miles de millones de electrones libres por cm^3 (por ejemplo, en 1 cm^3 de cobre hay $8{,}5 \cdot 10^{22}$ electrones libres); cuando el conductor se conecta a un generador, los electrones comienzan a desplazarse; pero la "orden" de ponerse en movimiento cruza todo el circuito a 300 000 km/s, de modo que todos los electrones libres que hay a lo largo de todo el circuito se ponen en marcha prácticamente en el mismo instante. Una vez en movimiento, los electrones se desplazan con *su* propia velocidad, que es muchísimo menor que la velocidad de la luz *.

Generadores de energía eléctrica

¿Por qué no se emplean las máquinas electrostáticas para hacer funcionar lámparas eléctricas, calentadores, etc.? Porque las máquinas electrostáticas producen muy pequeña cantidad de electricidad, aunque las cargas producidas tengan una tensión eléctrica muy grande, capaces de producir grandes chispas. De modo que si se conectara una lamparita eléctrica, por ejemplo, la cantidad de electricidad que cada segundo pasaría a través de ella sería insuficiente para encenderla. A ello se debe que las aplicaciones prácticas de la electricidad no avanzaran mucho cuando no había más generadores que las máquinas electrostáticas. El conocimiento y uso de la electricidad, descubierta unos 500 años antes de Cristo, sólo avanzó rápidamente a partir del año 1800, porque en ese entonces Volta construyó la primera pila. Hasta entonces, los fenómenos eléctricos sólo servían como entretenidos pasatiempos, tanto que un autor anterior a Volta llegó a

* Véase pág. 233, 2º ejercicio.



Una pila casera en funcionamiento.

escribir que "los fenómenos eléctricos, si bien son muy interesantes y novedosos, son absolutamente inútiles, y nada puede esperarse de ellos...".

Después de la pila se inventaron otros generadores: dínamos, pares termoeléctricos, etc., de los que nos ocuparemos más adelante. Estos generadores difieren entre sí en el fenómeno en que se basan, pero todos tienen en común que *son fuentes de energía eléctrica.*

Cómo fabricar una pila en casa

En un frasco de vidrio de boca ancha, de unos 10 cm de diámetro y 10 de altura, échese agua hasta que alcance un nivel de unos 6 a 8 cm. Sumérjase un trozo de cobre y otro de cinc, cada uno conectado a un trozo de cable común, y luego échese en el agua un chorrito de ácido sulfúrico. (¡Cuidado!: vierta siempre el ácido sobre el agua y no al revés.)

Si se ponen en contacto los extremos libres de los dos cables se producirá una pequeña chispa, y si el contacto se prolonga, se advertirá que de los cables se desprende calor, señal de que por ellos está circulando corriente.

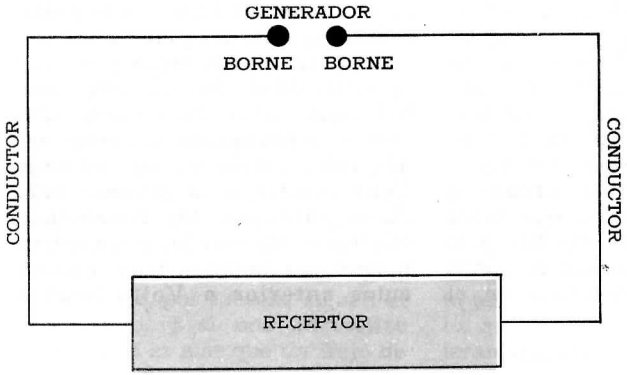
Elementos de un circuito eléctrico

Todo circuito eléctrico consta esencialmente de:

a) un *generador*, cuya función ya hemos analizado;

b) aparatos *receptores*, que reciben la energía eléctrica y la transforman en otras formas de energía;

c) conductores, mediante los cuales se transporta la corriente eléctrica desde el generador hasta los receptores, y desde éstos al generador.



Elementos de un circuito eléctrico.

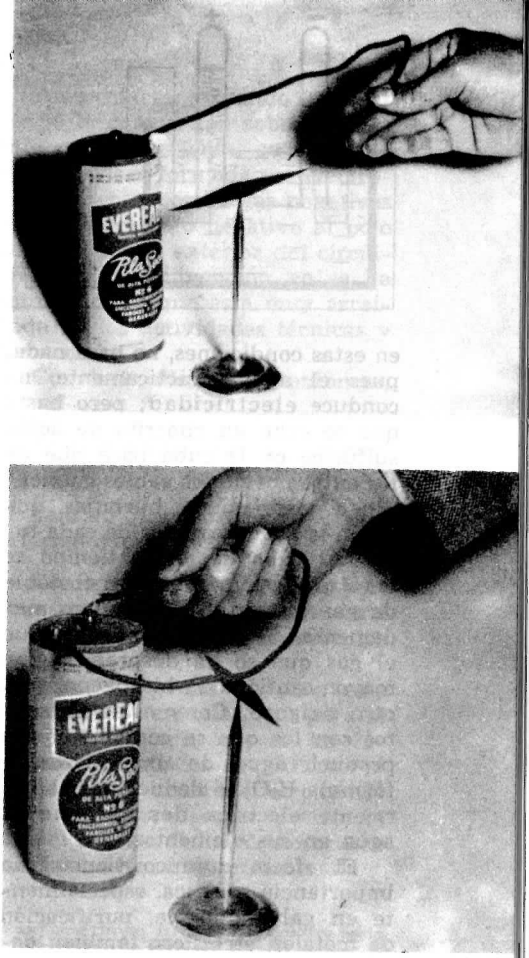
Efectos de la corriente eléctrica

Efecto térmico y luminoso

Sabemos que al pasar una corriente eléctrica por un alambre, éste se calienta y puede llegar a ponerse al rojo, como en los calentadores, o luminoso, como en las lámparas incandescentes.

Efecto magnético

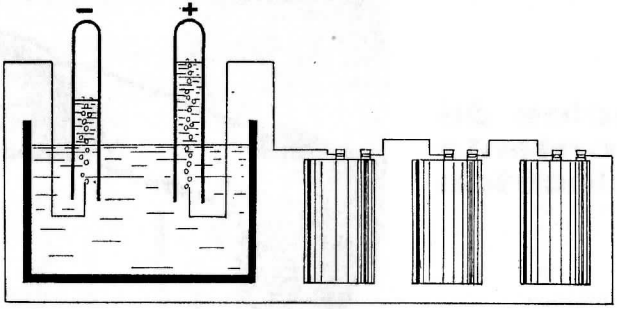
Es menos conocido pero de enorme importancia técnica y científica. Basta una simple pila y una aguja magnética para ponerlo de manifiesto. Se conecta un cable a cada uno de los bornes de la pila, se deja que la aguja magnética se oriente y quede en equilibrio, y luego se ponen en contacto los dos cables, cuidando que uno de ellos pase por encima de la aguja y paralelamente a la misma. Al pasar la corriente, la aguja magnética se desvía bruscamente de su posición, oscila durante unos instantes, y luego queda formando un cierto ángulo con su posición primitiva, mientras dura el paso de la corriente.



Efecto magnético de la corriente eléctrica.

Efecto químico

Para poner de manifiesto este efecto, échese agua en un recipiente de vidrio hasta que el nivel alcance unos 5 cm; luego se llenan totalmente de agua dos tubos de ensayo, se los tapa con el dedo, y se los sumerge invertidos en la cuba. Al quitar el dedo, el agua de los tubos no sale, debido a la presión atmosférica. Se conectan dos cables a los polos de una pila, y los extremos libres se sumergen en el agua, pero cuidando que queden exactamente debajo de los tubos invertidos. Cuando el aparato está



Efecto químico de la corriente eléctrica.

en estas condiciones, no pasa nada, pues el agua, prácticamente, no conduce electricidad; pero basta que se eche un chorrito de ácido sulfúrico en la cuba para que de los extremos de los cables comiencen a desprenderse burbujas, que van a la parte superior de cada tubo. Al cabo de cierto tiempo se verá que en un tubo hay el doble de gas que en el otro, aproximadamente. Se puede comprobar que el gas que se ha desprendido en mayor cantidad es hidrógeno, y el otro, oxígeno. Como estos elementos son los que se combinan para producir agua, de acuerdo con la fórmula H_2O, se deduce que la corriente eléctrica descompone al agua en sus elementos.

El efecto químico tiene gran importancia práctica, especialmente en galvanoplastia, purificación de metales, etc. Pero también debe indicarse su importancia teórica. El agua pura es muy poco conductora de la corriente. En estas experiencias del efecto químico vemos que basta agregar algunas gotas de ácido sulfúrico para que el agua se vuelva muy conductora. Esto ocurre no sólo con el ácido sulfúrico, sino con otros ácidos, y también con sales –como el cloruro de sodio, y bases, como el hidróxido de sodio. Las soluciones acuosas conductoras de la corriente se llaman *soluciones electrolíticas*; en estas soluciones, como veremos más adelante, la conducción de la corriente no se realiza por los electrones libres, como en los metales, sino por iones. Por eso, las soluciones electrolíticas se llaman también conductores de segunda especie, pues se da el nombre de conductores de primera especie a los metales.

¡CUIDADO CON LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS! Como es conveniente que el lector realice algunas de las experiencias que se indican en este texto, y en las cuales se emplea la corriente domiciliaria, es necesario que sepa en qué circunstancias puede recibir una descarga eléctrica. En todo enchufe hembra, los dos bornes son los terminales de dos cables aislados entre sí; uno de esos cables está electrizado, por lo cual al borne correspondiente se lo llama "polo vivo"; el otro, en cambio, no está electrizado, pues está conectado a tierra: se lo llama "neutro". Si se toca los dos cables a la vez, se recibe una descarga, pues nuestro cuerpo sirve de conexión entre ambos bornes. Pero también tocando solamente el polo "vivo" se produce una descarga entre ese conductor y tierra, a través de nuestro cuerpo. Únicamente si se toca el cable neutro no hay peligro de descarga.

Uno de los principales efectos fisiológicos de la corriente eléctrica es que produce la parálisis de los músculos que gobiernan la respiración. Por esto quien recibe una descarga, puede morir por asfixia.

Sentido de la corriente

¿Serán iguales, desde el punto de vista del comportamiento de la corriente, los dos polos de una pila? Para averiguarlo, invirtamos las conexiones en las experiencias, para mostrar los efectos magnéticos y químicos de la corriente. Observaremos que la aguja magnética ahora también se desvía, pero en el sentido opuesto al anterior; en la experiencia de la cuba electrolítica, también se observará el desprendimiento de burbujas, pero donde antes se recogía el hidrógeno, ahora se recoge oxígeno, y viceversa. De modo, pues, que los bornes de un generador no son eléctricamente equivalentes: la corriente eléctrica tiene un sentido determinado.

Para diferenciar los bornes, se llama *positivo* a uno, y *negativo* al otro. En la pila seca, el positivo es el del centro; en la pila casera que describimos antes, el polo positivo es la barrita de cobre, y el negativo, la de cinc.

En cuanto al sentido de la corriente, se ha convenido en que va del polo positivo al polo negativo por la parte exterior del circuito, y del negativo al positivo por el interior. Como toda otra convención, ésta también es absolutamente arbitraria y con el mismo derecho podría haberse establecido en el sentido contrario.

ADVERTENCIA: Cuando se estableció la convención sobre el sentido de la corriente, se ignoraba que estuviera formada por electrones, es decir, por cargas negativas que van del polo negativo al polo positivo por el exterior del circuito. Pero la convención no se ha cambiado, porque está muy arraigada en las actividades técnicas y comerciales.

Conviene distinguir, entonces, entre:

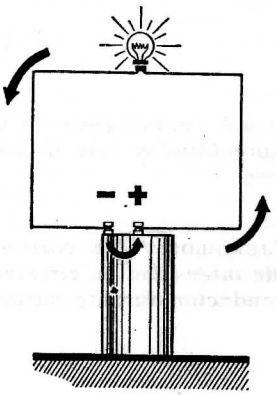
Sentido técnico de la corriente: del positivo al negativo.

Sentido físico de la corriente: del negativo al positivo.

Nosotros emplearemos el primero, pero teniendo presente cuál es el sentido en que se mueven los electrones.

Quizá sorprenda un poco esta aparente indiferencia, pero para el estudio de la mayoría de los fenómenos eléctricos es indiferente emplear un sentido o el otro, y sólo en algunos casos es preferible usar el sentido físico, como ocurre con las válvulas electrónicas.

La corriente circula desde el polo positivo hacia el negativo por la parte del circuito exterior al generador, y del negativo al positivo por el interior del generador.



Intensidad de una corriente

Así como una corriente de agua se caracteriza por su caudal (cantidad de líquido que pasa por segundo en un lugar determinado), una corriente eléctrica se caracteriza por su *intensidad.*

DEFINICIÓN: *Se llama intensidad de una corriente eléctrica al cociente entre la cantidad de electricidad que pasa por una sección del conductor y el tiempo que emplea en pasar.* En símbolos:

$$\boxed{I = \frac{q}{t}}$$

Unidad de intensidad. Si la cantidad de electricidad se mide por el número de electrones que pasan, y el tiempo en segundos, la intensidad se mediría en $\frac{\text{electrones}}{\text{segundo}}$. Pero el electrón es una cantidad de electricidad tan pequeña, que la unidad de intensidad que así resulta sería muy incómoda. Por eso se utiliza como unidad de cantidad de electricidad la carga de 10^{18} electrones, y se la llama coulomb. Luego:

1 coulomb $= 10^{18}$ electrones.

En símbolos:

$1\ C = 10^{18}\ e$.

En realidad, la equivalencia que damos entre coulombs y electrones no es exacta, pero nos basta para lo que necesitamos, en este momento.

Adoptando como unidad de carga eléctrica 1 coulomb y empleando el segundo como unidad de tiempo, se obtiene como unidad de intensidad de la corriente eléctrica el ampere, cuyo símbolo es A:

$$1\ A = \frac{1\ C}{1\ s} = 1\ \frac{C}{s}$$

Una corriente tiene una intensidad de 1 A cuando por una sección del conductor, en cada segundo pasa 1 C.

Por una sección de un conductor pasan 10^{16} electrones en 10 segundos. Calcular la intensidad de la corriente en $\frac{e}{s}$ y en A.

$$I = \frac{q}{t} = \frac{10^{18}\ e}{10^{s}} = 10^{15}\ \frac{e}{s}$$

Como $10^{18}\ e = 1\ C$, es $1\ e = 10^{-18}\ C$ $\therefore$

$$\therefore\ I = 10^{15} \cdot \frac{10^{-18}\ C}{s} = 10^{-3}\ \frac{C}{s} = 0{,}001\ A = 1\ mA$$

El mA (miliampere) es uno de los submúltiplos más usuales del ampere.

EJEMPLOS: *Una corriente de 5 A de intensidad ha circulado por un conductor durante media hora. ¿Qué cantidad de electricidad ha pasado? (Calcularla en coulombs y electrones.)*

$$q = I \cdot t = 5\ A \cdot 1\ 800^{s} = 9\ 000\ C$$

Como $1\ C = 10^{18}\ e$, $q = 9 \cdot 10^{21}$ electrones.

(Velocidad de los electrones libres). *En un centímetro cúbico de cobre hay* $8{,}5 \cdot 10^{22}$ *electrones libres. Se desea conocer la velocidad de desplazamiento de estos electrones en un cable de 0,56 cm de diámetro cuando es recorrido por una corriente de 20 A de intensidad.*

$$20\ \text{A} = 20\ \frac{\text{C}}{\text{s}} = 2 \cdot 10^{19}\ \frac{\text{electrones}}{\text{s}}$$

Calculemos cuánto tiempo tardan los $8{,}5 \cdot 10^{22}$ electrones que hay en 1 cm^3 en pasar por una sección:

Como $2 \cdot 10^{19}$ electrones pasan en 1 segundo,

$$8{,}5 \cdot 10^{22} \text{ tardarán } \frac{8{,}5 \cdot 10^{22}}{2 \cdot 10^{19}} =$$

$$= 4\,250 \text{ segundos}$$

¿Qué distancia recorren estos electrones en 4 250 segundos? Como ocupan 1 cm^3, recorren la altura de un cilindro de 1 cm^3 de volumen y 0,56 cm de diámetro.

Como

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h \ \therefore$$

$$\therefore \ h = \frac{1\ \text{cm}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (0{,}56\ \text{cm})^2} \cong 4\ \text{cm}$$

Por lo tanto, la velocidad de desplazamiento de los electrones es:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{4\ \text{cm}}{4\,250\ \text{seg}} \cong 0{,}0009\ \text{cm/s}$$

Aproximadamente 3 centímetros por hora. Como se ve, muy inferior a la velocidad de transmisión de la energía: 300 000 km/s.

Corriente continua (CC) y corriente alterna (CA)

Las pilas producen corriente continua, es decir, corriente que tiene intensidad y sentido constantes. En cambio la corriente usada en las ciudades es generalmente alterna; su sentido cambia 50 veces por segundo. Si ponemos una aguja magnética cerca de un conductor por donde circula corriente alterna, no se aprecia el efecto magnético; pero no porque no exista, sino porque la inercia impide a la aguja moverse 50 veces por segundo, para un lado y para el otro.

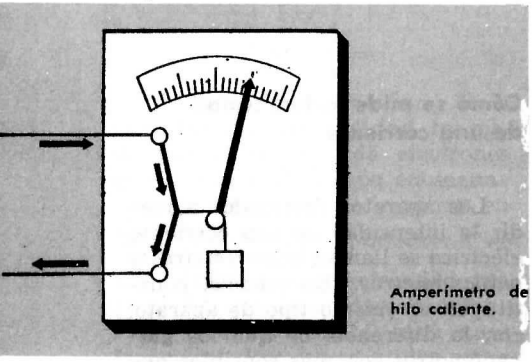
Cómo se mide la intensidad de una corriente

Los aparatos destinados a medir la intensidad de una corriente eléctrica se llaman *amperímetros* y *galvanómetros*. En esencia, constituyen un mismo tipo de aparato, con la diferencia de que los galvanómetros son más sensibles que los amperímetros.

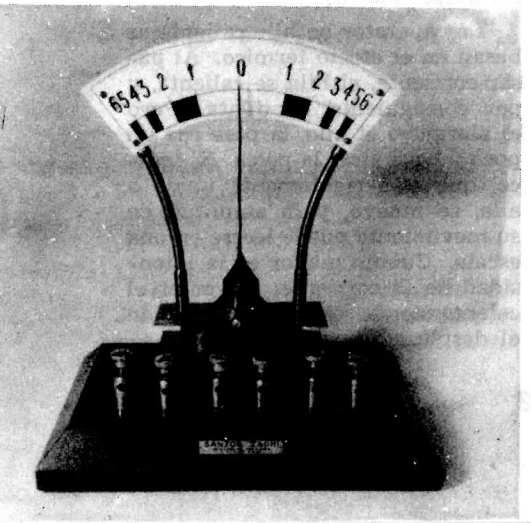
Los aparatos de hilo caliente se basan en el efecto térmico. Al pasar corriente, el hilo se calienta, y por consiguiente, se dilata. Pero al alargarse el hilo, la pesa cae un poco y hace girar la polea. El índice, que está rígidamente unido a ella, se mueve, y la amplitud de su movimiento puede leerse en una escala. Cuanto mayor es la intensidad de la corriente, mayor es el calentamiento, y mayor también el desplazamiento del índice.

Una ventaja importante de los aparatos basados en el efecto térmico es que tanto sirven para corriente continua como para alternada.

Los aparatos basados en el efecto magnético son de diversos tipos. En el de la fotografía de esta página la aguja magnética hace el papel de una balanza, y el índice unido a ella, el de fiel de la misma. Al pasar corriente, la aguja se inclina, y con ella el índice. Obsérvese que el conductor rodea repetidas veces a la aguja magnética, formando lo que se llama una *bobina*, para multiplicar el efecto y hacer más sensible el aparato.



Amperímetro de hilo caliente.



Cómo se calibra un amperímetro

Los amperímetros están graduados en amperes, de modo que para hacer la calibración del aparato es necesario saber con precisión cuándo una corriente tiene una intensidad de 1 A. Se ha comprobado que si se hace pasar una corriente de 1 A por una solución de nitrato de plata, en el electrodo negativo se depositan exactamente 1,118 mg de plata en cada segundo. La determinación experimental del ampere puede realizarse, entonces, con suma precisión, pues el problema se reduce a medir una masa (mediante una balanza) y un tiempo (con un reloj).

Cómo se conecta un amperímetro

Del mismo modo que para medir la cantidad de agua que pasa por un caño se coloca el medidor al paso de la corriente, un amperímetro debe ser colocado de modo que toda la corriente pase por él. Esta manera de conectar un aparato se llama conexión en serie.

Hay amperímetros para corriente continua y para corriente alternada. Los bornes de los amperímetros destinados a corriente continua tienen uno un signo (+) y otro un signo (—); al conectar el instrumento debe cuidarse que la corriente entre en el amperímetro por el borne señalado con (+) y salga por el borne (—). Esta precaución es innecesaria en los amperímetros para corriente alternada.

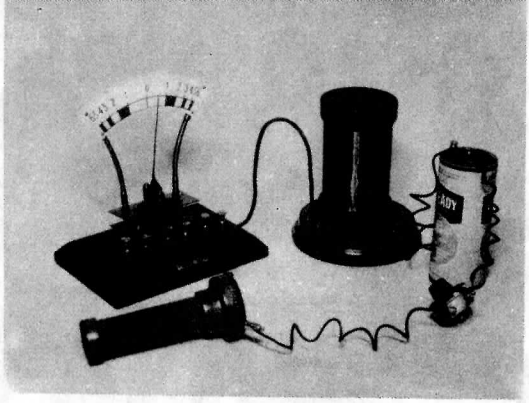
Amperímetro de imán móvil.

Alejandro Volta

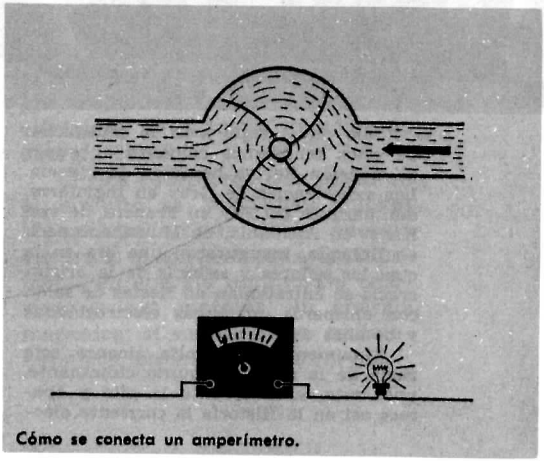
Hace más de dos siglos –febrero de 1745– nacía Alejandro Juan Antonio Volta, en la ciudad de Como (Italia); era el séptimo hijo de Felipe Volta y de la condesa María Magdalena Inzaghi. Las palabras voltio, voltímetro, voltámetro, pronunciadas o escritas diariamente por millones de personas, inmortalizan más a este hombre de genio que el título de conde que le fue conferido por el emperador Napoleón.

Durante más de dos mil años, desde los griegos hasta el siglo XVIII, la electricidad y el magnetismo constituyeron un territorio oscuro, apenas iluminado aquí y allá por débiles resplandores. En ese período, la humanidad concibió casi toda la filosofía, apareció el cristianismo y se propagó por toda Europa, cayeron imperios, se creó la mecánica, la geometría analítica, la balística y la astronomía; durante siglos aparecieron y desaparecieron grandes genios, como Platón, Santo Tomás, Leonardo, Galileo, Descartes, Newton y Pascal. Y sin embargo, el vasto continente de la electricidad siguió siendo una tierra incógnita, un territorio inexplorado y misterioso, de donde llegaban de vez en cuando vagas y fabulosas noticias. ¡Cuántas cosas grandes hizo el hombre en este período, sin lámparas eléctricas, sin radio, sin cine, sin teléfono y sin televisión!

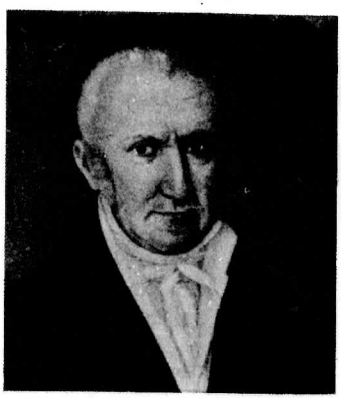
Durante dos mil años, apenas si aquí o allá algunos hombres observadores y curiosos notaron que en la Naturaleza existía algo misterioso, diferente de todo lo que se conocía. Tales de Mileto, seis siglos antes de Cristo, observó que una barra de ámbar frotado atraía pequeñas partículas de materia. Platón habla en sus *Diálogos* de la "piedra imán", y Lucrecio, unos cincuenta años antes de Cristo, cuenta cómo las limaduras de hierro contenidas en un platillo de bronce son movidas a distancia por una piedra magnética; Tito Livio, César y Plinio se refieren al misterioso fuego de San Telmo. Pasan más siglos, y el ámbar y la piedra imán siguen rodeados de misterio. Hay que llegar hasta la época de la reina Isabel y de Shakespeare para encontrar un gran explorador de este continente: el doctor Guillermo Gilbert, de quien hemos hablado.



El amperímetro se conecta en serie.



Cómo se conecta un amperímetro.



Alejandro Volta.

Cuadro de G. Bertini que muestra a Volta ante Napoleón Bonaparte, a quien le presenta la pila eléctrica.

Sólo en el siglo XVIII la indagación de estos fenómenos comenzó a ocupar la atención de los hombres de ciencia. Las experiencias de Gray en Inglaterra, del marqués Du Fay en Francia, de von Kleist en Alemania, de Musschenbroeck en Holanda, inauguraron una era en la cual los señores y señoras de la aristocracia se entretenían en fiestas de salón con chisperos, máquinas electrostáticas y botellas de Leyden.

Finalmente, con Volta alcanza esta rama de la física un punto culminante, pues este sabio inventa la pila y aparece así en la Historia la corriente eléctrica, el fenómeno físico que más ha revolucionado al mundo. Hay que pensar que esta invención se efectuó hacia 1800, es decir, hace apenas 150 años. Y en este corto período el hombre creó los motores eléctricos, las dínamos, las lámparas, el teléfono, la radiotelefonía, la televisión, etc.

Volta enseñó durante veinticinco años en la Universidad de Pavía, y además de la pila inventó el electróforo y el electroscopio de condensación. Era un conversador brillante y ameno, gran excursionista campestre y alpinista. Murió en 1827.

Problemas

1. Una corriente de 10 A de intensidad ha circulado por un conductor durante ½ hora. ¿Qué cantidad de electricidad ha pasado?

R.: 18 000 C; $18 \cdot 10^{21}$ electrones

2. Por una sección de un conductor ha pasado una carga de 120 C en 2min. Calcular la intensidad de la corriente en A.

R.: 1 A

3. La intensidad de una corriente es de 4 mA. ¿Qué carga eléctrica pasará por una sección del conductor en 5min?

R.: 1,2 C

4. Algunas válvulas de radio trabajan en corriente de 100 electrones por seg. Calcular esa intensidad en mA.

R.: 10^{-13} mA

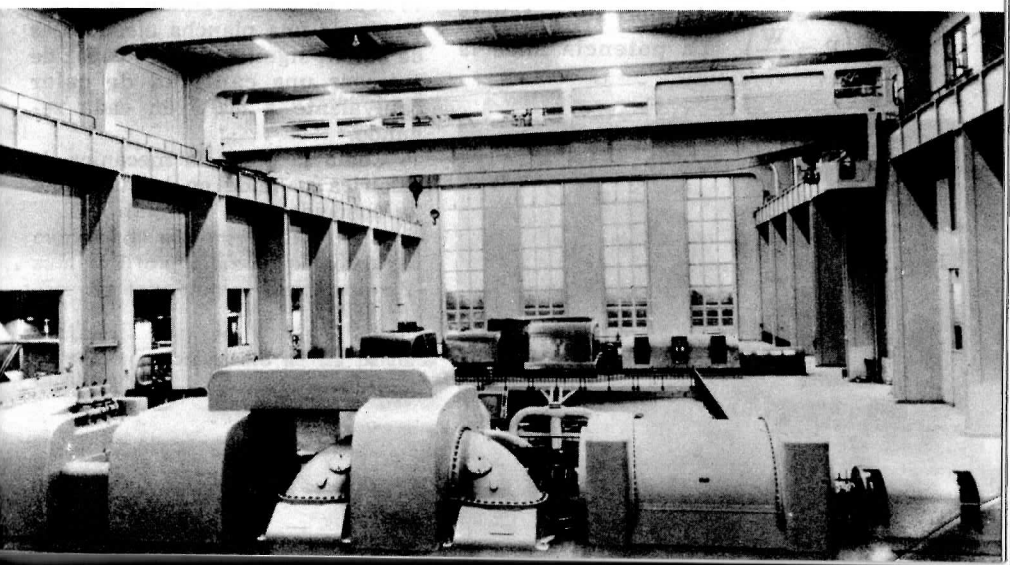
16 DIFERENCIA DE POTENCIAL Y FUERZA ELECTROMOTRIZ

Energía de un circuito

En un circuito, el generador suministra energía a todos los elementos del mismo. Pero, ¿de dónde saca esa energía el generador? Como la energía no se crea ni se destruye, se deduce que en el generador debe ocurrir una transformación de energía: alguna clase de energía debe transformarse en energía eléctrica. En las pilas y acumuladores, la energía eléctrica proviene de la transformación de energía mecánica a través de energía química; en las dínamos, de la transformación de energía magnética; en las pilas termoeléctricas, de la transformación de energía calórica.

En los receptores que están en el circuito se producen nuevas transformaciones de la energía eléctrica: si son lámparas, se transforma en energía luminosa y calórica; si son motores, en energía mecánica; si son aparatos radiotelefónicos, en energía sonora, etc.

Sala de generadores de una central termoeléctrica.



En los circuitos eléctricos, es donde ese "actor" que llamamos *energía* representa los más variados papeles, y en ello radica la extraordinaria importancia de la corriente eléctrica. Por eso, de entre todos los temas vinculados con los circuitos eléctricos, el que más interesa estudiar y comprender es el de la energía.

Unidades de energía eléctrica

Como cualquier otra clase de energía (potencial, cinética, calórica, química, etc.), la energía eléctrica se mide en las unidades ya conocidas:

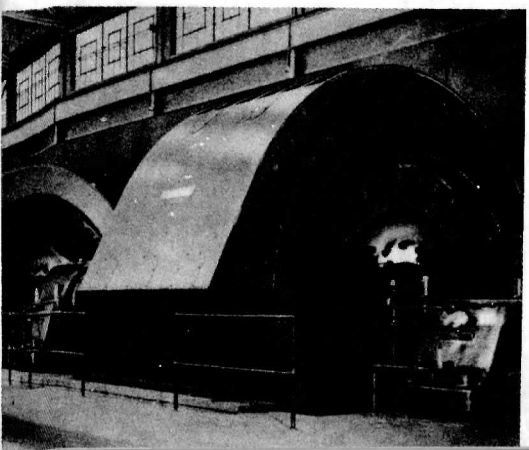
UNIDADES DE TRABAJO Y ENERGÍA
(Equivalencia aproximada)

Unidad	*kgm*	*J*	*erg*	*kWh*
1 kgm	1	9,8	$9{,}8 \cdot 10^{7}$	$2{,}72 \cdot 10^{-6}$
1 J	0,102	1	10^{7}	$0{,}278 \cdot 10^{-6}$
1 erg	$0{,}102 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	1	$0{,}278 \cdot 10^{-13}$
1 kWh	367 000	3 600 000	$3{,}6 \cdot 10^{12}$	1

Potencia de un aparato eléctrico

La capacidad de una máquina para producir energía se expresa generalmente por su potencia $\left(P = \frac{W}{t}\right)$. La potencia mide la energía que es capaz de entregar una máquina en cada unidad de tiempo. Si un motor tiene una potencia de 1 HP, significa que es capaz de realizar un trabajo de 75 kgm en cada segundo; si la potencia de una plancha eléctrica es de 500 W, significa que es capaz de entregar una cantidad de calor equivalente a 500 J en cada segundo.

Como la potencia mecánica, la eléctrica se mide en las unidades ya conocidas.



Generadores.

UNIDADES DE POTENCIA
(Equivalencia aproximada)

Unidad	*kgm/s*	*W*	*kW*	*erg/s*	*HP* *
1 kgm/s	1	9,8	0,0098	$9{,}8 \cdot 10^7$	0,0133
1 W	0,102	1	0,001	10^7	0,00136
1 kW	102	1 000	1	10^{10}	1,36
1 erg/s	$0{,}102 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	10^{-10}	1	$1{,}36 \cdot 10^{-10}$
1 HP[1]	75	735	0,735	$735 \cdot 10^7$	1

EJEMPLOS: *Un motor eléctrico de 2 HP funciona durante 10 horas. Calcular (en todas las unidades del cuadro):* a) *Energía suministrada por el motor;* b) *Costo de la misma, a razón de 5 $ el kWh.*

a) $W = P\,t = 2\ \text{HP} \cdot 10^{\text{h}} = 2 \cdot 75\ \frac{\text{kgm}}{\text{s}} \cdot 36\,000^{\text{s}} = 5\,400\,000\ \text{kgm}$

b) $W = 5\,400\,000\ \text{kgm} = 52\,920\,000\ \text{J} = 5\,292 \cdot 10^{11}\ \text{erg} = 14{,}7\ \text{kWh}$

Costo: $14{,}7\ \text{kWh} \cdot 5\ \frac{\$}{\text{kWh}} = 73{,}50\ \$$

¿Cuál es la potencia desarrollada por un ventilador, si en 5 horas de funcionamiento ha consumido una energía de 900 000 J? ¿Qué gasto ha habido, a razón de 5 $ el kWh?

$$P = \frac{T}{t} = \frac{900\,000\ \text{J}}{5^{\text{h}}} = \frac{900\,000\ \text{J}}{18\,000^{\text{s}}} = 50\ \text{W}$$

Gasto:

$$900\,000\ \text{J} \cdot 5\ \frac{\$}{\text{kWh}} = 900\,000 \cdot \frac{1}{3\,600\,000}\ \text{kWh} \cdot 5\ \frac{\$}{\text{kWh}} = \frac{900\,000 \cdot 5}{3\,600\,000}\ \$ = 1{,}25\ \$$$

Las dinamos de una usina funcionan con motores Diésel que consumen 2 toneladas de petróleo por día. Se sabe que el poder calorífico del petróleo vale 10 000 cal/g y que el rendimiento de esos motores Diésel es del 20 %. Si la energía entregada a las dínamos se

* HP es abreviatura de las palabras inglesas *Horse Power*, potencia de un caballo.

transforma íntegramente en energía eléctrica, calcular (en todas las unidades del cuadro): a) *La energía eléctrica suministrada por las dínamos en un día entero de funcionamiento;* b) *La potencia desarrollada por las dínamos.*

a) Energía calórica producida al quemar 2 ton de petróleo:

$$Q = c\,m = 10\,000\ \frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot 2\,t = 10\,000\ \frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot 2 \cdot 10^6\ \text{g} = 2 \cdot 10^{10}\ \text{cal}$$

En otras unidades:

$$Q = 2 \cdot 10^{10}\ \frac{1}{0{,}24}\ \text{J} \cong 8{,}3 \cdot 10^{10}\ \text{J} \cong 2{,}3 \cdot 10^{4}\ \text{kWh} \cong 23\,000\ \text{kWh}$$

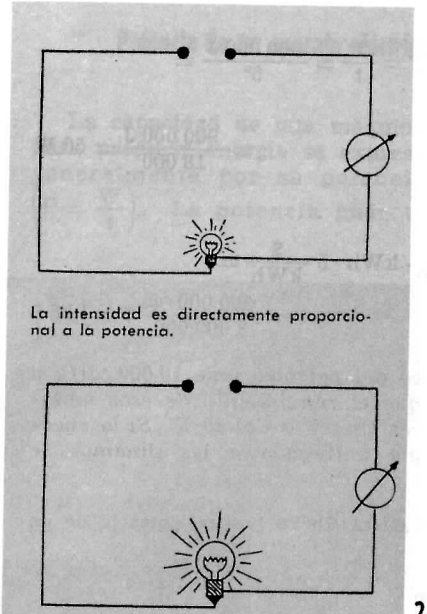
Energía eléctrica suministrada sabiendo que el rendimiento es del 20 %:

$$W = Q \cdot \frac{20}{100} = 4\,600\ \text{kWh}$$

b)
$$P = \frac{W}{t} = \frac{4\,600\ \text{kWh}}{24^{\text{h}}} \cong 191{,}7\ \text{kW}$$

POTENCIA ELÉCTRICA DE ALGUNOS APARATOS (expresada en W)

Tostador	550
Lavarropas	200
Ventilador	50
Disco de cocina	1 100
Plancha	550
Aspirador	180
Radio	80
Calefón	1 500
Estufa	660
Enceradora	200
Batidora	80
Televisor	200



La intensidad es directamente proporcional a la potencia.

Tensión, voltaje o diferencia de potencial eléctrico

Hay una expresión muy común en la vida diaria, de la cual puede decirse que muchos la usan, pero pocos conocen su significado: voltaje, tensión o diferencia de potencial.

Cuando en las indicaciones de una estufa eléctrica, por ejemplo, se lee 660 W, 220 V, se sabe que tiene una potencia de 660 W cuan-

do se la conecta en el enchufe domiciliario, "porque en el enchufe hay una tensión de 220 volts". Se sospecha que este último dato, 220 volts, tiene algo que ver con "la fuerza de la electricidad", o algo por el estilo.

Los siguientes experimentos nos enseñarán el significado preciso de la magnitud que en física se llama *diferencia de potencial*, o *tensión eléctrica*. Instalemos un circuito como el de la fig. anterior, donde se representa una lamparita de 22 W, conectada al enchufe domiciliario. Cerramos el circuito, y el amperímetro mide la intensidad de la corriente que circula: resulta 0,1 A.

Luego desconectémosla del circuito y conectemos otra lamparita, pero de 44 W. Ahora el amperímetro señala 0,2 A.

Por último, reemplacemos la segunda por una tercera lamparita, de 66 W. El amperímetro indica que ahora la intensidad de la corriente es de 0,3 A.

Se advierte que, en cada caso, a una determinada potencia corresponde una determinada intensidad de la corriente; pero hay algo que ha permanecido constante en toda la experiencia: el cociente de cada potencia por su correspondiente intensidad:

$$\left.\begin{aligned} \frac{P_1}{I_1} &= \frac{22\ W}{0{,}1\ A} = 220\ \frac{W}{A} \\ \frac{P_2}{I_2} &= \frac{44\ W}{0{,}2\ A} = 220\ \frac{W}{A} \\ \frac{P_3}{I_3} &= \frac{66\ W}{0{,}3\ A} = 220\ \frac{W}{A} \end{aligned}\right\} \therefore \frac{P_1}{I_1} = \frac{P_2}{I_2} = \frac{P_3}{I_3} = \text{constante}$$

Lo único que no ha variado en todo el experimento es la fuente de alimentación del circuito eléctrico, de modo que es natural admitir que el cociente entre la potencia con que funciona el aparato conectado y la intensidad de la corriente que circula por él, es una característica eléctrica de la fuente de alimentación que llamaremos *diferencia de potencial* o *tensión eléctrica*, entre los bornes del enchufe. Si en lugar de emplear el enchufe domiciliario se usa un acumulador o una pila, al mencionado cociente lo llamaremos *diferencia de potencial entre los bornes del acumulador*, o *de la pila, respectivamente*. En general pues:

DEFINICIÓN: *Se llama diferencia de potencial, o tensión eléctrica entre los bornes de un generador, al cociente entre la potencia con que funciona cualquier aparato conectado entre dichos bornes, y la intensidad de la corriente que circula por el aparato.*

En símbolos:

$$V = \frac{P}{I}$$

Significado físico de la diferencia de potencial

De lo que acabamos de establecer, resulta que la diferencia de potencial entre bornes representa la potencia que puede tener un aparato conectado en ellos, por cada ampere que circule por él. Es decir: si entre dos bornes hay una diferencia de potencial de $220 \frac{W}{A}$, ello significa que siempre que conectemos un aparato cualquiera en esos bornes, el aparato trabajará con una potencia de 220 W por cada ampere que circule por él. Por ejemplo: si se conecta un aparato y por él circula 1 A, ese aparato trabaja con una potencia de 220 W; si se conecta otro aparato, y por él circulan 2 A, la potencia de éste será de 440 W; si se conecta un tercer aparato, y por él circula ½ A, su potencia será de 110 W, etc.

Unidad de diferencia de potencial

Como la diferencia de potencial es el cociente entre la potencia y la intensidad, la unidad de diferencia de potencial se obtendrá como cociente entre la unidad de potencia y la unidad de intensidad. Si se usan el W y el A, se obtiene la unidad de diferencia de potencial llamada *volt*:

$$1\ V = \frac{1\ W}{1\ A}$$

Entre los bornes de un generador hay una diferencia de potencial de 1 V, si por un aparato conectado entre ellos circula 1 A y trabaja con una potencia de 1 W.

EJEMPLOS: *¿Cuál será la diferencia de potencial entre los bornes de un generador, si por una plancha conectada entre ellos circula una corriente de 2,5 A, y funciona con una potencia de 500 W?*

$$V = \frac{P}{I} = \frac{500\ W}{2{,}5\ A} = 200\ V$$

¿Cuál es la potencia del motor de un lavarropas, cuando está conectado a 220 V, si por él circula una corriente de 9 A?

$$P = V\,I = 220\ V \cdot 9\ A = 1\,980\ W$$

La potencia de un motor conectado a 110 V es de 0,5 HP. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que circula por él?

$$I = \frac{P}{V} = \frac{0{,}5\ HP}{110\ V} = \frac{0{,}5 \cdot 735\ W}{110\ V} = 33{,}4\ A$$

Cálculo de la energía eléctrica

Si un aparato de potencia P funciona durante un tiempo *t*, la energía consumida será:

$$W = P \cdot t$$

Si se trata de un aparato eléctrico conectado a una diferencia de potencial V, y por él circula una corriente de intensidad I, la energía eléctrica desarrollada por el aparato será:

$$\boxed{W = V\,I\,t}$$

Si la diferencia de potencial se mide en *volts*, la intensidad en *amperes* y el tiempo en *segundos*, la energía se obtiene en *joules*.

EJEMPLO: *Por un motor eléctrico conectado a 220 V circula una corriente de 10 A. Calcular el trabajo que puede realizar en 2 horas.*

$$T = V\,I\,t = 220\ V \cdot 10\ A \cdot 2^h = 220\ V \cdot 10\ A \cdot 7\,200^s = 15\,840\,000\ J$$

Si se quiere calcular el trabajo realizado, en kWh, conviene hacer el cálculo así:

$$T = P\,t = (220\ V \cdot 10\ A) \cdot 2^h = 2\,200\ W \cdot 2^h = 2{,}2\ kW \cdot 2^h = 4{,}4\ kWh$$

EJEMPLOS: *La potencia desarrollada por un motor es de 3 HP.* a) *¿Qué energía consume en 5h?* b) *¿Qué intensidad tiene la corriente que circula por él, si está conectado a 220 V?*

$$a)\quad W = P\,t = 3\ HP \cdot 5^h = 3 \cdot 0{,}735\ kW \cdot 5^h = 11{,}025\ kWh$$

$$b)\quad I = \frac{P}{V} = \frac{3 \cdot 735\ W}{220\ V} = 10\ A$$

a) *¿Qué potencia tiene una plancha eléctrica que trabaja con 1,5 A a 220 V?* b) *¿Cuánto cuesta planchar durante 2 horas, si el kWh vale 5 $?*

$$a)\quad P = V\,I = 220\ V \cdot 1{,}5\ A = 330\ W = 0{,}33\ kW$$

$$b)\quad T = P\,t = 0{,}33\ kW \cdot 2^h = 0{,}66\ kWh$$

$$\text{Gasto: } 0{,}66\ kWh \cdot 5\,\frac{\$}{kWh} = 3{,}30\ \$$$

Una estufa de 600 W funcionó durante 6 h. a) *¿Qué energía ha consumido en ese tiempo?* b) *¿Qué cantidad de calor produjo?* c) *¿Con qué intensidad ha trabajado, si estaba conectada a 220 V?*

$$a)\quad W = P\,t = 0{,}6\ kW \cdot 6^h = 3{,}6\ kWh$$

$$b)\quad Q = 3{,}600\ kWh = 3{,}6 \cdot 3\,600\,000\ J =$$
$$= 3{,}6 \cdot 3\,600\,000 \cdot 0{,}24\ cal^* = 3\,110\,400\ cal$$

$$c)\quad I = \frac{P}{V} = \frac{600\ W}{220\ V} = 2{,}7\ A$$

Tensión y energía

En la fórmula $W = V\,I\,t$, el producto $I\,t$ representa la carga eléctrica $q = I\,t$ que ha pasado por el aparato al cabo del tiempo t de funcionamiento. Por lo tanto, podemos escribir:

$$W = V \cdot q$$

Y de esta fórmula obtenemos inmediatamente

$$V = \frac{W}{q},$$

* Recuérdese que 1 J = 0,24 cal.

que permite observar desde otro punto de vista el significado físico de la diferencia de potencial V entre los bornes de un generador: *representa la energía eléctrica W necesaria para que la carga de 1 C recorra todo el circuito, desde un borne hasta el otro.*

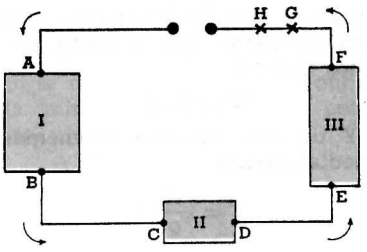
Por lo tanto,

$$1\ V = \frac{1\ J}{1\ C}$$

Ahora podemos decir que *entre dos bornes existe una diferencia de potencial de 1 V, cuando se gasta una energía de 1 J en hacer pasar a 1 C desde un borne al otro.*

Se podría decir que la diferencia de potencial entre bornes es "algo así" como el precio en joules que debe pagar cada coulomb para recorrer el circuito. Es decir: si entre dos bornes hay una diferencia de potencial de 220 V, cada coulomb que circule por el circuito "deberá pagar" 220 J. Es decir que cada coulomb podrá hacer funcionar aparatos eléctricos "por un valor" de 220 joules.

Diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito. En el circuito de la figura hay varios aparatos conectados. Cada aparato "cobra" una cierta cantidad de joules para trabajar. En lugar de medir la energía consumida en él por la cantidad total de joules gastados en hacerlo funcionar durante un cierto tiempo, podemos hacerlo por la cantidad de joules "pagada" por cada coulomb para atravesar el aparato. Es decir, mediante el cociente entre la energía consumida y la cantidad total de carga que ha atravesado el aparato. Si el aparato I ha consumido una energía W_{AB} al ser atravesado por la carga q, la cantidad de energía gastada por cada coulomb es W_{AB}/q.



Pero ese cociente no es otra cosa que la diferencia de potencial entre los bornes A y B del aparato I:

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

Análogamente, para los aparatos II y III:

$$V_{CD} = \frac{W_{CD}}{q} \qquad V_{EF} = \frac{W_{EF}}{q}$$

V_{AB}, V_{CD} y V_{EF} son, pues, las diferencias de potencial entre los bornes de los aparatos I, II y III. Pero A y B, C y D, E y F son pares de puntos del circuito, de modo que en lugar de hablar de diferencia de potencial entre los bornes de un aparato, se puede hablar de diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito:

Diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito es el cociente entre la energía eléctrica consumida al pasar una carga de un punto al otro, y dicha carga eléctrica.

Consideremos ahora los puntos H y G, entre los cuales no hay ningún aparato. ¿Hay entre H y G una diferencia de potencial? Aparentemente no parece que allí se gastara energía; pero si bien no hay entre esos puntos ningún aparato, el alambre que los une se calienta cuando pasa la corriente, lo que es una prueba de que allí se gasta una cierta cantidad de energía eléctrica en transformarse en energía calórica.

De acuerdo con todo esto, podemos decir en forma general:

CUANDO UNA CARGA q CIRCULA ENTRE DOS PUNTOS CUALESQUIERA DE UN CIRCUITO ENTREGA UNA ENERGÍA. LA DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE ESOS PUNTOS ES IGUAL AL COCIENTE ENTRE LA ENERGÍA ENTREGADA Y LA CARGA QUE HA CIRCULADO.

ADVERTENCIA: Las diferencias de potencial entre puntos de un circuito entre los cuales no hay ningún aparato, se llaman generalmente "caídas de tensión en la línea". Generalmente son pequeñas respecto de las demás, y se las suele despreciar. Así lo haremos nosotros, salvo expresa advertencia en contra.

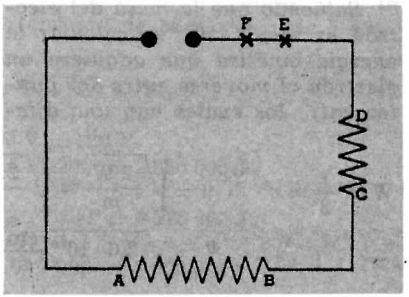
EJEMPLOS: *En un circuito hay conectados dos aparatos; uno ha consumido una energía de 1 000 J y el otro 3 000 J, al circular una carga de 10 C. Calcular:* a) *Diferencia de potencial entre los bornes A y B del primero;* b) *Diferencia de potencial entre los bornes C y D del segundo;* c) *Si los aparatos funcionaron 2 min, ¿cuál fue la intensidad de corriente?*

$$a)\quad V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{1\,000\ J}{10\ C} = 100\ V$$

$$b)\quad V_{CD} = \frac{W_{CD}}{q} = \frac{3\,000\ J}{10\ C} = 300\ V$$

$$c)\quad I = \frac{q}{t} = \frac{10\ C}{2^{m}} = \frac{10\ C}{120^{s}} = 0{,}083\ A$$

En el circuito de la figura, AB simboliza un ventilador y CD una batidora. La intensidad de corriente es de 0,5 A, y en media hora el ventilador ha consumido una energía de 180 000 J y la batidora 140 000 J. Calcular: a) *Tensión entre A y B;* b) *Tensión entre C y D;* c) *Carga q que ha circulado;* d) *Tensión entre A y D.*



$$a)\quad \left.\begin{aligned} V_{AB} &= \frac{W_{AB}}{q} \\ q &= I\,t \end{aligned}\right\} \therefore\ V_{AB} = \frac{W_{AB}}{I\,t} = \frac{180\,000\ J}{0{,}5\ A \cdot 1\,800^{s}} = 200\ V$$

b) Análogamente:

$$V_{CD} = \frac{W_{CD}}{I\,t} = \frac{140\,000\ J}{0{,}5\ A \cdot 1\,800^s} = 155{,}5\ V$$

c) $q = I\,t = 0{,}5\ A \cdot 1\,800^s = 900\ C$

d) $V_{AD} = \frac{W_{AD}}{q} = \frac{180\,000\ J + 140\,000\ J}{900\ C} = \frac{320\,000\ J}{900\ C} = 355{,}5\ V$

EJEMPLOS: *En el problema anterior, la cantidad de calorías desprendida por el conductor en el trozo EF es de 4,5 cal en media hora. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre E y F?*

$$V_{EF} = \frac{W}{q} = \frac{4{,}5\ cal}{900\ C \cdot 0{,}24\ \frac{cal}{J}} = \frac{4{,}5}{900 \cdot 0{,}24}\ \frac{J}{C} \cong 0{,}02\ V$$

¿Qué energía adquiere un electrón, al moverse entre dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial de 1 volt? Esta cantidad de energía se usa como unidad en física atómica, recibiendo el nombre de electrón-volt, y su símbolo es: eV. Un múltiplo muy empleado es el MeV (Megaelectronvoltio, que vale 10^6 eV). La carga de un electrón es: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C:

$$W = V\,q = 1\ V \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J,$$

o sea:

$$1\ eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J = 1{,}6 \cdot 10^{-12}\ erg$$

$$1\ MeV = 1{,}6 \cdot 10^{-13}\ J = 1{,}6 \cdot 10^{-6}\ erg$$

Sabiendo que la masa del electrón es $m = 9 \cdot 10^{-28}$ g, calcular la energía cinética que adquiere un electrón al moverse entre dos puntos entre los cuales hay una diferencia de potencial de 1 000 V. ¿Cuál es la velocidad adquirida por el electrón?

$$W = 1\,000\ eV = 1{,}6 \cdot 10^{-9}\ erg$$

$$W = \frac{1}{2} m v^2 \ \therefore\ v = \sqrt{\frac{2\,W}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-9}\ erg}{9 \cdot 10^{-28}\ g}} \cong \sqrt{0{,}36 \cdot 10^{19}}\ \frac{cm}{s}$$

$$v = \sqrt{3{,}6 \cdot 10^{20}}\ \frac{cm}{s} \cong 1{,}9 \cdot 10^{10}\ \frac{cm}{s}$$

NOTA: En la solución de este problema prescindimos de considerar que, a velocidades tan cercanas a la de la luz ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s), de acuerdo con la teoría de la relatividad la masa de un mismo cuerpo es mayor que a velocidades despreciables respecto de la de la luz.

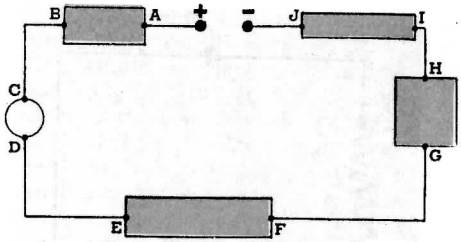
Tensión total y tensiones parciales

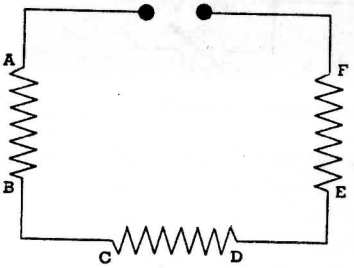
De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la tensión entre los bornes del genera-

dor debe ser igual a la suma de todas las tensiones parciales que se producen en el circuito. En el circuito de la primera figura, supongamos que la tensión entre bornes sea de 200 V, y que las tensiones en cada aparato son:

$$V_{AB} = 80\ V\ ; \qquad V_{CD} = 40\ V\ ;$$
$$V_{EF} = 40\ V\ ; \qquad V_{GH} = 20\ V\ ;$$
$$V_{IJ} = 20\ V$$

Como la tensión entre bornes es de 200 V, significa que cada coulomb de carga recibe allí una energía de 200 J. Entre A y B consume 80 J; entre C y D, 40 J; entre E y F, 40 J; entre G y H, 20 J y entre I y J, 20 J. En cada aparato, la energía entregada por cada coulomb debe ser tal que la suma de todas las energías gastadas en el circuito no supere a la energía recibida por ese coulomb en el generador.





EJEMPLO: *En el circuito de la segunda figura la tensión entre bornes vale 300 V y las tensiones parciales* $V_{AB} = 80\ V$; $V_{EF} = 100\ V$. a) *¿Cuánto vale la diferencia de potencial entre C y D?* b) *¿Qué energía consume cada aparato trabajando durante 2 horas, si la intensidad de corriente vale 5 A?*

a) $V = V_{AB} + V_{CD} + V_{EF}$ $\therefore$ $V_{CD} = V - V_{AB} - V_{EF}$

b) AB consume:

$$V_{CD} = 300\ V - 80\ V - 100\ V = 120\ V$$
$$W_{AB} = V_{AB}\, I\, t = 80\ V \cdot 5\ A \cdot 7\,200^{s} = 2\,880\,000\ J$$

CD consume:

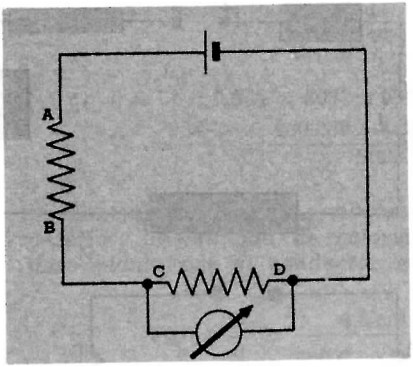
$$W_{CD} = V_{CD}\, I\, t = 120\ V \cdot 5\ A \cdot 7\,200^{s} = 4\,320\,000\ J$$

EF consume:

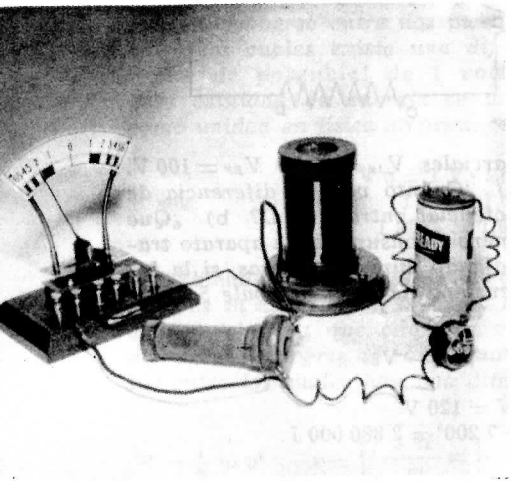
$$W_{EF} = V_{EF}\, I\, t = 100\ V \cdot 5\ A \cdot 7\,200^{s} = 3\,600\,000\ J$$

Medición de una diferencia de potencial

Para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito (como los bornes C y D del aparato de la fig. de pág. 248) se usa un aparato llamado *voltímetro*, que se conecta entre esos puntos, como se observa en el dibujo (conexión en *paralelo*). El voltímetro, como el amperímetro, es un aparato que funciona por los efectos de la corriente eléctrica. En esencia, un voltíme-



Cómo se conecta un voltímetro.



tro difiere muy poco de un amperímetro, tanto que un amperímetro puede funcionar como voltímetro (y recíprocamente) si se lo adapta previamente para la respectiva medición (ver capítulo anterior).

ADVERTENCIA: Hay voltímetros para corriente continua, voltímetros para corriente alterna, y para ambas corrientes. Cuando se usa un voltímetro de corriente continua, hay que observar que los bornes tienen la indicación de la polaridad, con un signo + y un signo —. La conexión debe hacerse, como en el amperímetro para corriente continua, de modo que la corriente entre por el borne + y salga por el borne —.

El generador y la diferencia de potencial entre sus bornes

Hasta ahora nos hemos ocupado exclusivamente de lo que ocurre en la parte del circuito *exterior al generador*. Sabemos que al conectar un aparato entre ambos bornes, se obtiene energía, pero también sabemos que los bornes reciben esa energía del generador.

¿Qué relación hay entre el generador y la diferencia de potencial entre sus bornes? Tomemos un caso sencillo, en donde el generador es una simple pila. Una primera cuestión es la siguiente: ¿Se calienta la pila cuando circula la corriente? Sí, aunque generalmente el calentamiento es muy pequeño. Una experiencia que permite apreciarlo consiste en unir los dos bornes de una pila mediante un alambre grueso. Éste se calienta mucho, pero la pila, aunque mucho menos, también se calienta. (Si la experiencia se prolonga, la pila se estropea.)

¿Qué conclusión se obtiene de este hecho? Pues, que la carga eléctrica que atraviesa el generador entrega una cierta cantidad de energía, que se transforma en calor. Pero esto significa que en la pila se produce una caída de tensión, que se puede calcular dividiendo la energía transformada en

calor por la carga eléctrica que ha circulado. Esta caída se llama *caída de tensión interna de la pila.*

Fuerza electromotriz de un generador

Hemos visto que una carga que circule por un circuito realiza un gasto de energía en la parte del circuito exterior al generador, y también en la parte interior del generador. El total de la energía gastada por la carga le ha sido provisto por el generador.

DEFINICIÓN: *Se llama fuerza electromotriz (f. e. m.) de un generador a la energía suministrada por dicho generador a cada coulomb, para que recorra íntegramente el circuito, en el exterior y en el interior del generador.*

Pero esa cantidad de energía entregada a cada coulomb no es más que la suma de las caídas de tensión en todo el circuito, inclusive la caída interna del generador; en símbolos:

$$e = V_e + V_i ,$$

en donde e es la f. e. m. del generador, V_e la suma de las caídas de tensión externas, y V_i la caída de tensión interna.

Unidad de f. e. m.

La unidad de f. e. m. es el *volt.* Un generador tiene una f. e. m. de 1 V cuando suministra una energía de 1 J a cada coulomb que circule por el circuito.

Naturalmente que si un generador tiene una f. e. m. de 50 V, por ejemplo, si bien significa que cada coulomb que circula ha sido provisto de una energía de 50 J, esa energía no podrá ser íntegramente aprovechada por un aparato conectado en ese generador, pues una parte de ella debe ser gastada por la carga para atravesar el generador.

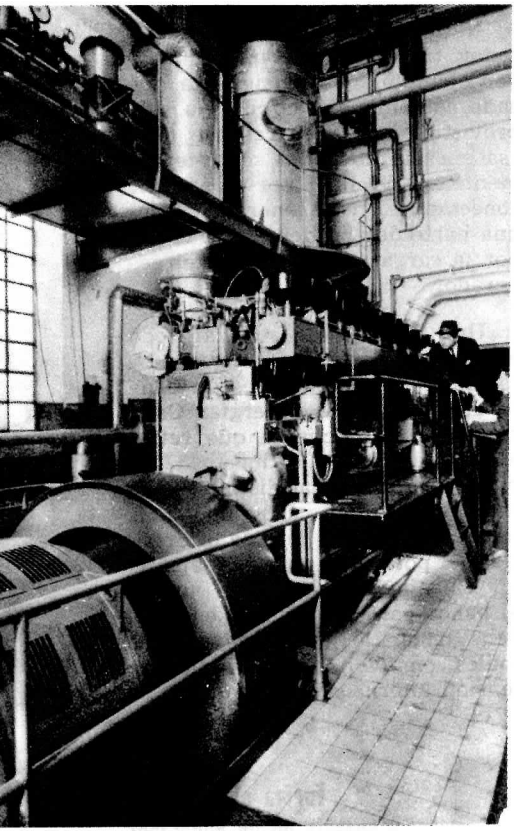
Una forma de visualizar todo esto es imaginar el siguiente mecanismo: el generador es un banco donde se presta energía. Cada coulomb es un cliente que retira energía del banco, y luego la usa para hacer funcionar distintos aparatos, dejando en cada uno tantos joules como volts tiene la diferencia de potencial en cada aparato. Cuando cada coulomb vuelve al banco para recibir más energía, debe pagar los intereses (tantos joules como volts tenga la caída de tensión interna del generador).

Fuerza electromotriz y energía de un generador

Supongamos un generador de f. e. m. e, que funcione durante un tiempo t haciendo circular una corriente de intensidad I. ¿Qué energía ha producido el generador?

Como $I\,t = q$ es la carga que ha circulado, y cada coulomb ha ido provisto de una energía de e joules, resulta que la energía puesta en juego por el generador es:

$$W = e \cdot q$$



Motor de gas natural, que mueve el rotor de un generador eléctrico. La energía consumida al quemarse el gas se transforma en energía eléctrica.

Ésa es la energía puesta en juego por el generador, *pero no es la energía utilizable por los aparatos conectados en el circuito*, porque, como ya lo hemos anticipado, las cargas deben gastar cierta energía en la caída de tensión interna del generador. De modo, pues, que la caída interna es algo que debe disminuirse todo lo que sea posible.

EJEMPLOS: *La fuerza electromotriz de una pila es de 2,1 V. Conectada en un circuito suministra una intensidad de 4 A. Calcular:* a) *Potencia de la pila;* b) *Energía producida en media hora de funcionamiento.*

a) $P = e\,I = 2{,}1\ V \cdot 4\ A = 8{,}4\ W$

b) $W = P\,t = 8{,}4\ W \cdot \frac{1}{2}\ h = 4{,}2\ Wh = 15\,120\ J$

Un generador conectado a un circuito ha producido una energía de 9 000 J en 15 minutos. En ese lapso, el calor producido en el generador al paso de la corriente es de 480 calorías. La carga total que ha circulado es de 100 C. Calcular: a) *F.e.m. del generador;* b) *Intensidad de corriente;* c) *Energía utilizable;* d) *Diferencia de potencial entre los bornes del generador;* e) *Caída interna de potencial en el generador.*

a) Como

$W = e \cdot q$

$$e = \frac{W}{q} = \frac{9\,000\ J}{100\ C} = 90\ V$$

b) Como

$$I = \frac{q}{t} = \frac{100\ C}{15 \cdot 60^s} = 0{,}11\ A$$

c) En el generador se ha "perdido" una energía de 480 cal equivalente a $\frac{480\ cal}{0{,}24\ cal/J} = 2\,000\ J$.

Por lo tanto la energía utilizable

$W_u = 9\,000\ J - 200\ J = W_u = 7\,000\ J.$

d) La diferencia de potencial entre los bornes del generador V_r es:

$$V_r = \frac{W_r}{q} = \frac{7\,000\ J}{100\ C} = 70\ V$$

e) La caída de potencial interna en el generador es:

$$V_i = \frac{W - W_r}{q} = \frac{2\,000\ J}{100\ C} = 20\ V$$

Problemas

1. Calcular la intensidad de corriente en una lámpara de 44 W que trabaja a una tensión de 220 V.

R.: 0,2 A

2. Por una lámpara conectada a 220 V pasa una corriente de 0,4 A. Si el kWh cuesta 3 $, ¿cuánto gastará si está encendida 100 horas?

R.: 26,40 $

3. Las lámparas de ½ W consumen ½ W por cada bujía de intensidad. Si el kWh cuesta 3 $, ¿cuánto gastará una lámpara de 50 bujías en 8 horas?

R.: 0,60 $

4. Por un calefón eléctrico pasa una corriente de 15 A. Está conectado a 220 V y el kWh vale 3 $. ¿Cuánto cuesta darse un baño de 15 minutos?

R.: 2,50 $

5. Entre los dos conductores de una red de alumbrado eléctrico hay una diferencia de potencial de 220 V. ¿Qué trabajo realizan las fuerzas eléctricas cuando una cantidad de electricidad de 0,1 coulomb pasa de uno a otro? ¿A qué cantidad de calor es equivalente dicho trabajo?

R.: 22 J; 5,25 cal

6. Se quiere construir una estufa eléctrica para 220 V que produzca 1 000 kilocalorías por hora. ¿Cuál será la intensidad de la corriente?

R.: 5,3 A

7. La potencia de un motor eléctrico para 220 V es de 4,5 HP. ¿Cuál es la intensidad de la corriente, suponiendo un aprovechamiento de la energía del 90 %?

R.: 16,7 A

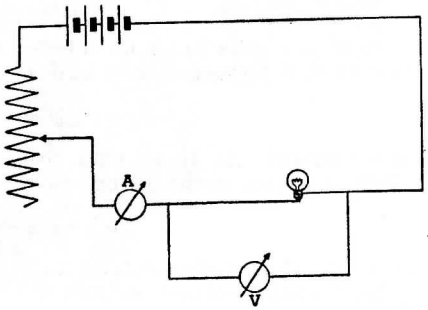
8. En una cierta válvula de radio la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo es de 200 V. Un electrón en estado de reposo sobre el cátodo es atraído por el ánodo. ¿Cuál es la velocidad del electrón al chocar contra el ánodo? ¿Qué energía posee el electrón al chocar?

R.: $v \cong 0{,}8 \cdot 10^9$ cm/s; $3{,}2 \cdot 10^{-17}$ J

17 LEY DE OHM

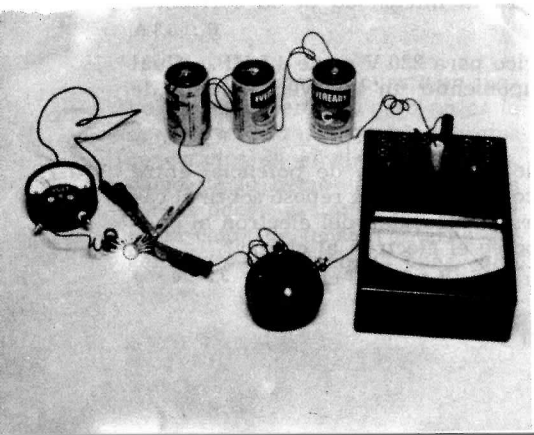
Relación entre voltaje y amperaje

Con una lamparita para linterna y una batería para radio que tenga varias fuerzas electromotrices (por ejemplo, 3, 6 y 9 volts) podemos comprobar que existe una relación entre el voltaje y el amperaje. Cuando la lamparita está conectada a 6 V brilla más que cuando lo está con 3 V; es decir que cuanto mayor es el voltaje, mayor es la intensidad de la corriente.



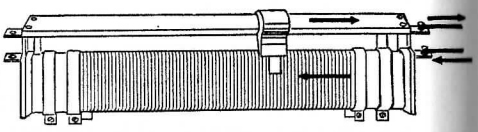
Esquema del circuito para estudiar la ley de Ohm.

Para saber exactamente la relación de ambas magnitudes, es necesario hacer mediciones, para lo cual necesitamos un amperímetro y un voltímetro. Con esos elementos armamos el circuito de la figura, con el que podemos obtener una de las leyes más importantes de la electricidad: la *ley de Ohm*. El amperímetro mide la intensidad que atraviesa la lámpara; el voltímetro, la caída de potencial que se produce en la lámpara. Para variar la intensidad de corriente en el circuito utilizamos un apara-

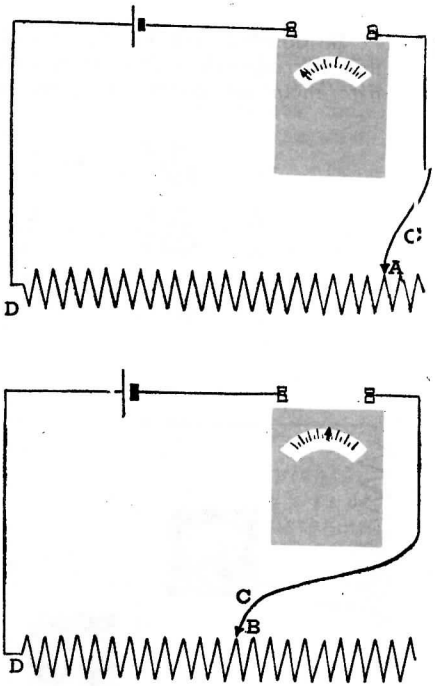


Circuito para estudiar la ley de Ohm.

Esquema de un reóstato de cursor, que muestra la entrada y salida de la corriente.



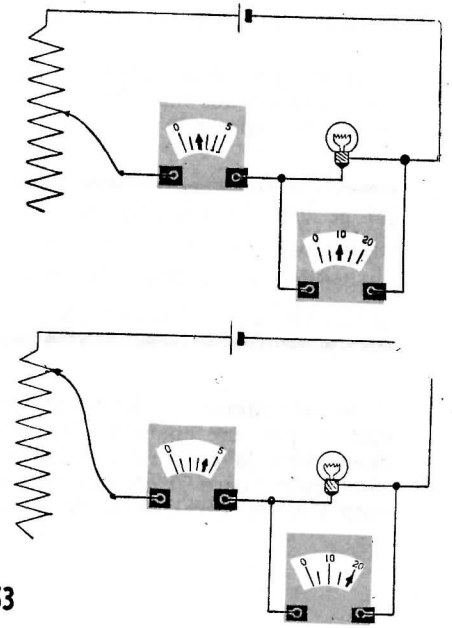
Cómo varía la intensidad de corriente mediante un reóstato.



to llamado *reóstato*, que consiste en un alambre enrollado sobre material aislante, con las espiras y un cursor que se desliza por un eje paralelo al núcleo. Al moverse el cursor se hace contacto en puntos distintos del alambre y el amperímetro indica que la intensidad va variando. Cuando el cursor está en A, por ejemplo, la corriente recorre todo el reóstato; cuando está en B, sólo atraviesa la porción BD, y la intensidad aumenta; cuando el cursor toca en D, el reóstato queda fuera del circuito y la intensidad es mayor que antes. Los reóstatos son aparatos muy útiles y se pueden adquirir por poco dinero en los comercios de artículos para radiotelefonía; los reóstatos empleados en aparatos de esta clase, son circulares, y no mayores que un reloj de bolsillo.

Resistencia eléctrica

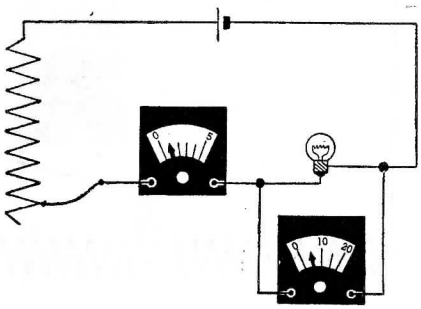
Supongamos que por el circuito de la tercera figura circule una intensidad de 0,02 A y que el voltímetro indique 10 V; con el reóstato modificamos la intensidad de la corriente hasta 0,04 A; el voltímetro indicará 20 V; disminuimos la intensidad a 0,01 A, y la caída de potencial en la lámpara (que es lo que indica el voltímetro), será de 5 V; etc.



Como se ve, en la figura de arriba el amperímetro indica 0,02 A y el voltímetro 10 V; en la de abajo, el amperímetro marca 0,04 A y el voltímetro 20 V.

Se observa que *a cada intensidad corresponde una determinada diferencia de potencial*, pero no arbitrariamente, pues se advierte que:

$$\left.\begin{aligned} \frac{V_1}{I_1} &= \frac{10\ V}{0{,}02\ A} = 500\ \frac{V}{A} \\ \frac{V_2}{I_2} &= \frac{20\ V}{0{,}04\ A} = 500\ \frac{V}{A} \\ \frac{V_3}{I_3} &= \frac{5\ V}{0{,}01\ A} = 500\ \frac{V}{A} \end{aligned}\right\} \quad \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_3}{I_3} = \text{constante}$$



El amperímetro indica 0,01 y el voltímetro 5 V.

Hay, pues, una proporcionalidad entre las dos magnitudes, que es lo que expresa la:

Ley de Ohm: La intensidad de la corriente que circula por un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus extremos.

Si se cambia la lámpara por otra o por un aparato eléctrico cualquiera, la proporcionalidad se mantendrá, pero el cociente entre cada V y su correspondiente I tomará un valor distinto de 500 V/A y cada aparato dará un cociente distinto.

Este cociente, constante y propio para cada aparato, revela una característica suya, a la que llamaremos *resistencia eléctrica del aparato*. Se representa con la letra R.

Podemos escribir, entonces,

$$R = \frac{V}{I}$$ **Ley de Ohm**

La unidad de resistencia eléctrica

Es el ohm, definido así:

$$1\ \text{ohm} = \frac{1\ \text{volt}}{1\ \text{ampere}}$$

Un aparato tiene una resistencia de 1 ohm cuando una diferencia de potencial de 1 volt hace pasar por él una corriente de 1 ampere.

El símbolo del ohm es la letra griega Ω (omega mayúscula), por convención internacional. Por lo tanto

$$1\ \Omega = 1\ \frac{V}{A}$$

Así como para la medida de longitudes se dispone de un metro patrón, para la medida de resistencias existe 1 ohm patrón, que es la resistencia de una columna de mercurio de 1 mm² de sección y 106 cm de longitud, a 0° C.

CONVENCIÓN. Todos los aparatos ofrecen resistencia al paso de la corriente eléctrica, por lo cual en los circuitos designaremos a todos con el mismo símbolo: . Por lo tanto, una resistencia en un circuito puede representar cualquier aparato: plancha, calentador, lámpara, etc.

Los cables conductores que unen el generador a los receptores, también tienen resistencia, pero como en la mayoría de los casos es mucho menor que la de los aparatos, no la tendremos en cuenta –salvo advertencia explícita–, y los representaremos como hasta ahora, es decir, con segmentos de recta.

EJEMPLOS: *¿Qué resistencia eléctrica tiene un conductor, sabiendo que cuando la atraviesa una intensidad de 5 A la caída de tensión que se produce es de 100 V?*

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{100\ V}{5\ A} = 20\ \Omega$$

La potencia de una plancha eléctrica que trabaja a 220 V es de 250 W. ¿Cuál es su resistencia eléctrica?

$$\left.\begin{array}{l} R = \dfrac{V}{I} \\ P = V\,I \;\therefore\; I = \dfrac{P}{V} \end{array}\right\} \;\therefore\; R = \frac{V}{P/V} = \frac{V^2}{P} = \frac{(220\ V)^2}{250\ W} \cong 194\ \Omega$$

Significado físico de la ley de Ohm

De la fórmula $R = \frac{V}{I}$ deducimos que

$$I = \frac{V}{R}$$

es decir:

> La intensidad de una corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus extremos, e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del conductor.

Este nuevo enunciado –que se puede verificar experimentalmente– permite extraer conclusiones muy provechosas:

1) Supongamos que un hombre riega su jardín con el agua de un tanque colocado a cierta altura. Cuanto mayor sea la altura a que está el tanque, mayor es la fuerza con que sale el agua, y por lo tanto, mayor es la cantidad de agua que sale por segundo, es decir: la intensidad es tanto mayor cuanto mayor es la diferencia de nivel.

Algo parecido podemos decir para la corriente eléctrica, asimilando la caída de tensión o diferencia de potencial a la diferencia de nivel hidráulico: cuanto mayor

es V, mayor es I. Si V se duplica, I se duplica; si V se triplica, se triplica I; si V se reduce a la mitad, también la I se reduce a la mitad, etc.

2) Volvamos a una corriente hidráulica: para que pueda circular, es fundamental que exista una diferencia de nivel hidráulico. Análogamente para la corriente eléctrica: si en la fórmula suponemos que V vale cero, entonces I también vale cero. Es decir:

Para que entre dos puntos de un conductor circule una corriente eléctrica, es necesario que entre ellos exista una diferencia de tensión.

¿Quién crea esa diferencia de tensión entre los distintos puntos del circuito? Evidentemente, el generador, cuya función podemos enunciar así:

La f. e. m. de un generador crea y mantiene las diferencias de tensión entre los distintos puntos del circuito.

Si no hay f. e. m., no hay diferencia de tensión, y por lo tanto, no circula corriente.

3) De la fórmula $R = \frac{V}{I}$ resulta $I = \frac{V}{R}$; es decir, que I es inversamente proporcional a R. De ahí que se le haya dado el nombre de resistencia al cociente V/I, pues cuanto mayor es R, menor es I: si R se duplica, I se reduce a la mitad; si R se triplica, I se hace tres veces menor, etc.

EJEMPLOS: *Un calentador de 73,3 Ω de resistencia se conecta a 220 V. Calcular la intensidad que atraviesa al calentador.*

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220\ V}{73{,}3\ \Omega} = 3\ A$$

Calcular la intensidad de corriente que circula por una resistencia de 400 Ω, cuando se la conecta a 20 V. ¿Qué energía consume en media hora?

$$I = \frac{V}{R} = \frac{20\ V}{400\ \Omega} = \frac{1}{20}\ A = 0{,}05\ A$$

$$W = V\,I\,t = 20\ V \cdot \frac{1}{20}\ A \cdot 1\,800^{s} = 1\,800\ J$$

Caída de tensión

De la fórmula

$R = \frac{V}{I}$, deducimos que:

$$V = I\,R$$

Es decir:

La caída de tensión en un conductor es igual al producto de la intensidad que lo atraviesa por la resistencia eléctrica del mismo.

Por lo tanto, $1\ V = 1\ A \cdot 1\ \Omega$, o sea: *1 V es la caída de tensión que se produce en una resistencia de 1 Ω cuando la atraviesa una intensidad de 1 A.*

Fuerza electromotriz y resistencia total

Como en toda resistencia por la que circula corriente se produce una caída de tensión, podemos calcular cuánto vale la caída total de tensión que se produce en un circuito.

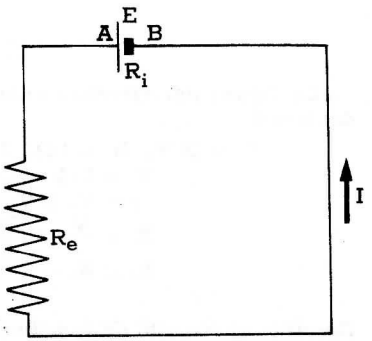
Para ello dividamos al circuito en dos partes: 1) el circuito mismo, o *circuito externo*, es en la figura, de A a B, por fuera; llamaremos R_e a su resistencia total. 2) al *circuito interno*: es el generador (de B a A, por adentro); llamaremos R_i a la resistencia propia del generador.

La caída total en el circuito externo vale:

$$V_e = I \cdot R_e$$

La caída en el circuito interno,

$$V_i = I \cdot R_i$$



Pero sabemos que la f. e. m. es igual a la suma de todas las caídas de tensión que se producen en el circuito:

$$e = V_e + V_i =$$
$$= I \cdot R_e + I \cdot R_i = I\,(R_e + R_i),$$

y si llamamos $R_t = R_e + R_i$, resistencia total de todo el circuito,

$$e = I \cdot R_t, \quad \text{de donde}$$

$$I = \frac{e}{R_t}$$

que es la llamada *ley Ohm para un circuito cerrado*:

> La intensidad de la corriente en un circuito cerrado es directamente proporcional a la fuerza electromotriz del generador, e inversamente proporcional a la resistencia total del circuito.

EJEMPLOS: *En el circuito de la figura superior, los datos son:* $R_e = 20\ \Omega$; $R_i = 2\ \Omega$; $I = 1{,}5\ A$. *Calcular* e, V_e *y* V_i

$$e = I\,R_t = 1{,}5\ A\ (20\ \Omega + 2\ \Omega) = 33\ V$$

$$V_e = I \cdot R_e = 1{,}5\ A \cdot 20\ \Omega = 30\ V$$

$$V_i = I \cdot R_i = 1{,}5\ A \cdot 2\ \Omega = 3\ V$$

Como se ve,

$$e = V_e + V_i = 30\ V + 3\ V = 33\ V$$

La figura del ejercicio anterior representa ahora un circuito cuyos datos son:

$V_e = 20\ V$; $R_i = 1\ \Omega$; $I = 5\ A$. Calcular R_e, e, V_i y R_t.

$$V_i = I \cdot R_i = 5\ A \cdot 1\ \Omega = 5\ V$$
$$e = V_e + V_i = 20\ V + 5\ V = 25\ V$$
$$R_e = \frac{V_e}{I} = \frac{20\ V}{5\ A} = 4\ \Omega$$
$$R_t = R_e + R_i = 4\ \Omega + 1\ \Omega = 5\ \Omega$$

Resolver el circuito de la primera figura:

V_e es igual a la suma de todas las caídas de tensión externa, o sea:

$$V_e = V_1 + V_2 + V_3 = I\,R_1 + I\,R_2 + I\,R_3$$
$$V_e = 2\ A \cdot 10\ \Omega + 2\ A \cdot 20\ \Omega + 2\ A \cdot 5\ \Omega$$
$$V_e = 20\ V + 40\ V + 10\ V = 70\ V$$

Además,

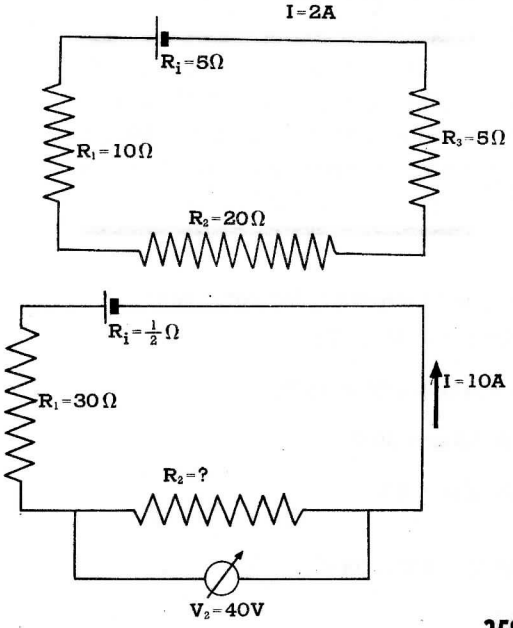
$$V_i = I\,R_i = 2\ A \cdot 5\ \Omega = 10\ V$$

Entonces,

$$e = V_e + V_i = 70\ V + 10\ V = 80\ V$$

Resolver el circuito de la segunda figura.

Calculamos R_2 teniendo en cuenta que:



$$R_2 = \frac{V_2}{I} = \frac{40\ V}{10\ A} = 4\ \Omega$$

Entonces,

$$V_e = V_1 + V_2 = I\,R_1 + I\,R_2$$
$$V_e = 10\ A \cdot 30\ \Omega + 40\ V = 340\ V$$

Además:

$$V_i = I\,R_i = 10\ A \cdot \frac{1}{2}\ \Omega = 5\ V$$

Por lo tanto:

$$e = V_e + V_i = 340\ V + 5\ V = 345\ V$$

Cálculo de la resistencia de un conductor

La resistencia de un conductor –a temperatura constante– depende de tres factores: *longitud, sección* y *material* de que está hecho.

a) *La resistencia es directamente proporcional a la longitud.* Utilice el dispositivo de la figura de página 259: observará que a doble longitud corresponde intensi-

dad mitad, lo que significa –porque la tensión es constante– resistencia doble; a triple longitud, triple resistencia, etc.

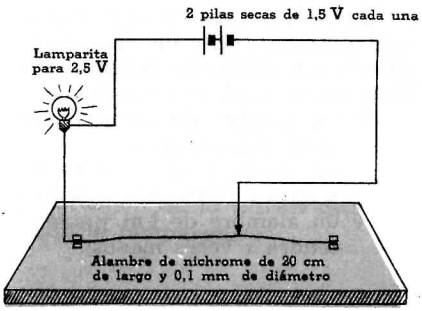
b) *La resistencia es inversamente proporcional a la sección.* En el esquema de la segunda figura, los alambres son del mismo material y longitud, pero de secciones diferentes: a *doble* sección, *doble* intensidad, es decir, resistencia *mitad*; a *triple* sección, resistencia *tres veces menor*, etc.

c) *La resistencia depende del material.* Sabemos que hay buenos y malos conductores de la electricidad. Los mejores conductores son la plata, el cobre, el oro y el aluminio; regulares son el cinc, el hierro y el estaño; pobres el mercurio, el platino y el carbón.

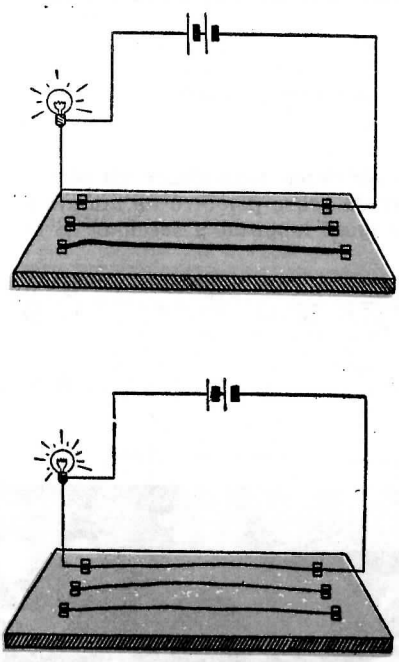
Para comprobar la influencia del material, tomamos hilos de la misma longitud y sección (por ejemplo: 1 m y 1 mm^2), pero de distinto material; por ejemplo: cobre, hierro y plomo. Las resistencias correspondientes a 20° C son:

Cobre	0,017 Ω
Hierro	0,10 Ω
Plomo	0,20 Ω

Cada uno de los valores anteriores mide la llamada *resistencia específica* o *resistividad del material*, que se designa con la letra griega ρ (rho). En consecuencia, la *resistividad expresa la resistencia que tiene un conductor de 1 m de largo y 1 mm^2 de sección.* Decir que la resistividad del cobre vale 0,017 52 Ω $\frac{mm^2}{m}$, significa que un conductor de cobre de 1 m de largo y 1 mm^2 de sección tiene una resistencia de 0,017 Ω.



Arriba): Circuito para comprobar que la resistencia es directamente proporcional a la longitud. Abajo): Circuito para intercalar conductores de igual material y longitud, pero de diferentes secciones: a **mayor sección** corresponde **menor resistencia.**



Circuito para intercalar conductores de igual longitud y sección, pero de diferentes materiales: a cada material corresponde una resistencia distinta.

Conocidas estas propiedades, una sencilla regla de tres compuesta nos permitirá obtener una fórmula para calcular resistencias:

Si un alambre de 1 m y 1 mm² tiene resistencia ϱ
un alambre de l m y 1 mm² tendrá l veces más, o sea $\varrho\, l$
y un alambre de l m y s mm² tendrá s veces menos,

o sea $\varrho \dfrac{l}{s}$

$$\boxed{R = \varrho \frac{l}{s}}$$

EJEMPLOS: *Calcular la resistencia de un conductor de hierro de 157 km de longitud y 2 mm de diámetro.*

$$R = \varrho \frac{l}{s}\ ; \qquad s = \text{sección del conductor} = \pi r^2$$

$$s = 3{,}14 \cdot 1\ \text{mm}^2 = 3{,}14\ \text{mm}^2$$

$$R = 0{,}10\ \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{157\,000\ \text{m}}{3{,}14\ \text{mm}^2} = 5\,000\ \Omega$$

¿Qué longitud de alambre de cobre de 1 mm² de sección se necesitaría para construir una resistencia de 1 Ω?

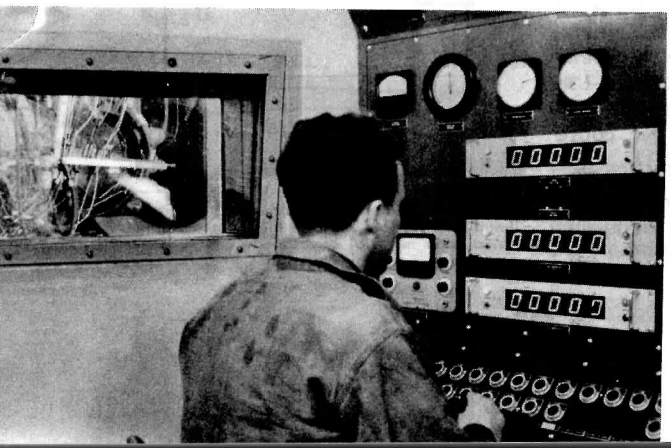
$$R = \varrho \frac{l}{s} \therefore\ l = \frac{R \cdot s}{\varrho}$$

$$l = \frac{1\ \Omega \cdot 1\ \text{mm}^2}{0{,}017\ \Omega \dfrac{\text{mm}^2}{\text{m}}} = 58{,}8\ \text{m}$$

Se desea reemplazar un alambre de cobre por otro de aluminio de igual longitud y sección. Si la resistencia del alambre de cobre vale 20 Ω, ¿cuánto valdrá la del alambre de aluminio?

$$R_1 = \varrho_{Cu} \frac{l}{s}\ ; \quad R_2 = \varrho_{Al} \frac{l}{s} \therefore\ \frac{R_1}{R_2} = \frac{\varrho_{Cu}}{\varrho_{Al}} \therefore$$

$$\therefore\ R_2 = R_1 \frac{\varrho_{Al}}{\varrho_{Cu}} = 20\ \Omega \frac{0{,}026\ \Omega \dfrac{\text{mm}^2}{\text{m}}}{0{,}017\ \Omega \dfrac{\text{mm}^2}{\text{m}}} \cong 30{,}6\ \Omega$$



Operario fuera de la celda antiacústica pone en movimiento, por control electrónico, un motor de un jet armado para su ensayo. (Scandinavian Air System.)

RESISTENCIA ESPECÍFICA
(en Ω mm²/m)

Aluminio	0,026
Bronce	0,13 a 0,29
Carbón	100 a 1 000
Cinc	0,06
Cobre	0,017
Constantán	0,50
Estaño	0,12
Hierro	0,10
Invar	0,75
Manganina	0,42
Mercurio	0,95
Nicrome	1,1
Níquel	0,12
Niquelina	0,42
Oro	0,022
Plata	0,016
Plomo	0,21
Tungsteno	0,059

NOTA: La resistencia específica de un metal depende mucho de su pureza. Bastan rastros de impureza para disminuir notablemente su conductibilidad. Así, por ejemplo, la resistividad específica del cobre aumenta 50 % con sólo 0,1 % de arsénico.

REÓSTATOS. Hemos visto que un reóstato es un alambre enrollado, con un contacto móvil, el cursor, cuyo desplazamiento permite intercalar más o menos resistencia en el circuito y, por lo tanto, modificar la intensidad de la corriente. Su funcionamiento es sencillísimo: la resistencia de un conductor depende de su longitud; con el cursor se hace variar la longitud de resistencia intercalada en el circuito.

Los reóstatos tienen múltiples aplicaciones. En las salas de espectáculos, el maquinista acciona un reóstato y varía la intensidad luminosa a voluntad. En los tranvías, el conductor mueve un reóstato. Al hacerlo, la intensidad de la corriente que acciona los motores aumenta o disminuye, y con ello aumenta o disminuye la velocidad del tranvía.

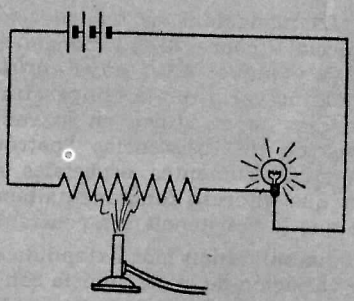
Variación de la resistividad con la temperatura

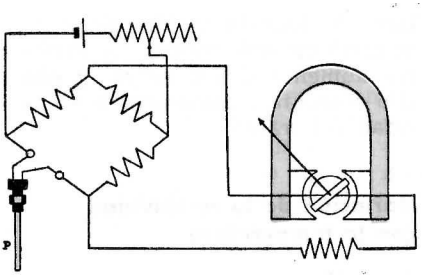
La resistividad de los conductores varía con la temperatura, como lo comprueba el dispositivo de la figura.

Si se trata de metales, se comprueba que la resistencia *aumenta* al *aumentar* la temperatura.

En el caso del carbón, la porcelana y muchos óxidos metálicos, ocurre lo contrario: la resistividad *disminuye* al *aumentar* la temperatura. Así, las antiguas lámparas de filamento de carbón tardaban en encenderse por este motivo; las actuales, de filamento metálico, se encienden mucho más rápidamente.

Al calentar el conductor, la intensidad aumenta, lo que prueba que su resistencia disminuye. Realícese la experiencia con una batería de 6 V, un alambre de cobre de unos 40 cm de largo y alrededor de 1 mm de diámetro, y una lamparita para 6 V.





Esquema de un pirómetro de resistencia. El alambre colocado en P se introduce en el lugar cuya temperatura se quiere medir. Se mide su resistencia, y con ese valor se calcula la temperatura a que ha estado sometido.

Esta propiedad del carbono se aplica principalmente en la "compensación" de instrumentos. Por ejemplo: la resistencia propia de un amperímetro varía con la temperatura; para evitarlo, se coloca en serie con la bobina del amperímetro una resistencia de carbono calculada de modo tal que su resistencia disminuya tanto como aumenta la de la bobina, con lo que la resistencia total permanece constante. De este modo el instrumento queda "compensado" para cualquier variación de temperatura.

La manganina es una aleación especial (cobre 84 %, manganeso 12 % y níquel 4 %) cuya resistividad no varía con la temperatura. Por eso se la utiliza en la construcción de resistencias "patrón" y de instrumentos especiales en los que interesa fundamentalmente que la resistencia sea constante.

La aplicación más extendida de la variación de la resistencia con la temperatura la constituyen los *termómetros* o *pirómetros de resistencia*, muy empleados en la industria para la medición de temperaturas.

La temperatura se mide por comparación con el valor que tiene una resistencia a esa temperatura. La medida de la resistencia se hace mediante un puente de Wheatstone.

Cada día tienen mayor aplicación los *termistores* que responden a pequeñísimas variaciones de temperatura (0,001° C). Se fabrican en forma de disco, barras y alambres, con óxidos de manganeso, níquel, cobre, cobalto, uranio, etc., y basta que la temperatura aumente 1° C para que su resistencia disminuya 5 %. Los termistores se emplean principalmente en la medición, control y compensación de temperaturas, y en mecanismos especiales de control.

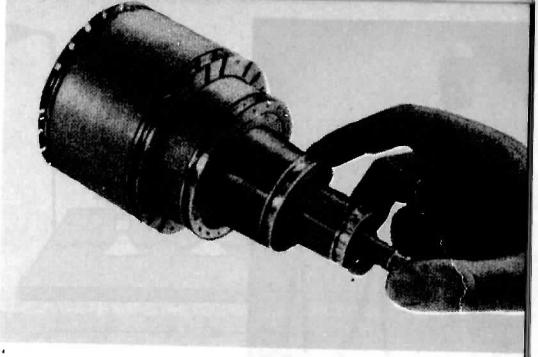
SUPERCONDUCTIVIDAD. La resistividad de los metales disminuye progresivamente a medida que disminuye la temperatura.

Así, por ejemplo, el plomo a 8° K (—265° C) tiene una resistencia específica mil veces menor que a 0° C. Pero trabajando a temperaturas más cercanas al 0° K, el físico holandés Kammerlingh-Onnes descubrió un fenómeno extraño, que llamó *superconductividad*: en algunos metales, la disminución de la resistividad es gradual hasta una cierta temperatura; basta disminuir esa "temperatura de transición" algunos centésimos de grado para que la resistividad se anule casi completamente. Así, en el plomo, dijimos que a 8° K su resistividad es mil veces menor que a 0° C; a 7,2° K su resistencia se hace extraordinariamente más pequeña, nada menos que 10^{12} (¡1 billón!) veces menor. Prácticamente a esa temperatura el plomo no tiene resistencia eléctrica. Por lo tanto, una corriente que circule por un alambre de plomo a 7,2° K –o a temperatura menor– puede durar indefinidamente. Cuando Kammerlingh-Onnes realizó su descubrimien-

to efectuó una notable experiencia: mediante métodos magnéticos indujo una corriente eléctrica en una espira de plomo que estaba a 7,2° K. Luego viajó a Londres y ante la Royal Society mostró que en la espira todavía seguía circulando la corriente que había inducido en su laboratorio de Holanda.

Desde el descubrimiento de Kammerlingh-Onnes se ha trabajado intensamente en superconductividad y se han encontrado unos 25 elementos y centenares de aleaciones que son superconductores. La temperatura a la que la resistencia desaparece –llamada temperatura de *transición*– varía con el material: 1° K para el magnesio; 1,5° K para el aluminio; 3,8° K para el estaño; un compuesto de niobio y estaño posee la temperatura más alta: 18° K.

Desde que se descubrió la superconductividad, los físicos soñaron con la posibilidad de construir superelectroimanes: bobinas fabricadas con material superconductor en las que, una vez creado el campo magnético por una corriente eléctrica, no se necesitaría ninguna energía para mantenerlo, por cuanto la corriente seguiría circulando por el conductor prácticamente por siempre, ya que no habría disipación de calor por efecto Joule. Pero lamentablemente se descubrió que la superconductividad y el campo magnético no eran compatibles: el campo creado por la corriente circulante en el superconductor destruía la superconductividad. Y así ocurría que el campo más intenso que se podía obtener lo era en niobio y alcanzaba a sólo 2 000 O_e. Pero en 1961, J. Kunzler en los laboratorios de la Bell en Estados Unidos de América, descubrió que en un compuesto de niobio y estaño, el campo magnético podía llegar hasta 88 000 O_e sin que la superconductividad desapareciera. Este descubrimiento revolucionó todos los estudios y rápidamente se descubrieron otros compuestos similares, con los que se han obtenido campos de hasta 200 000 O_e. Las consecuencias prácticas serán importantísimas. Piénsese que para hacer funcionar un electroimán convencional de 88 000 O_e se necesitan 1 500 kW de potencia y un tremendo sistema de enfriamiento para refrigerar las bobinas que conducen la corriente eléctrica. Para instalar un sistema así se requieren varios galpones y un costo del orden de los 80 000 000 de pesos. En cambio, un electroimán superconductor

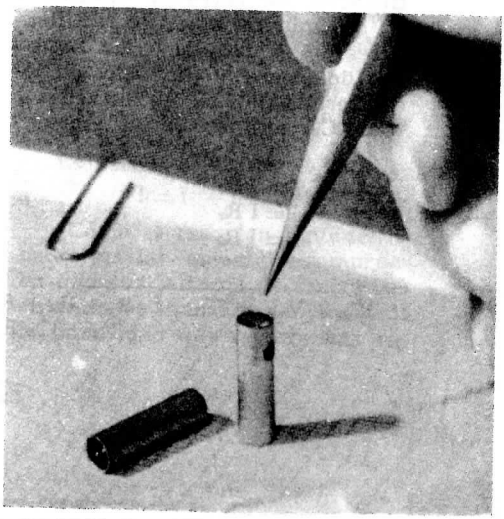


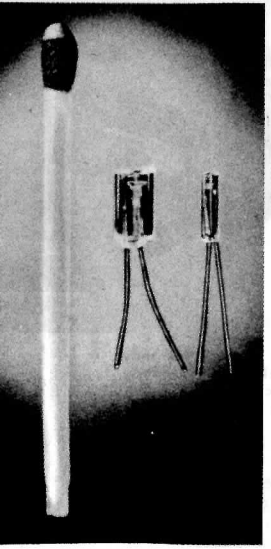
Este pequeño electroimán es uno de los más poderosos fabricados hasta el presente: puede producir un campo magnético de 70 000 Oe. Sus espiras son alambres de una aleación de niobiozirconio.

de la misma potencia puede medir unos 15 cm, el equipo de enfriamiento cabe en una habitación común y el costo total no llega a 10 000 000 de pesos.

Los SEMICONDUCTORES. Hasta ahora hemos clasificado las sustancias, desde el punto de vista de la conducción eléctrica, en buenos conductores, como los metales, y malos conductores o aisladores, como el vidrio, el lacre, la goma, etc. Pero hay además otra categoría de sustancias, llamadas

Apréciese el pequeño tamaño de un transistor de germanio, cuya eficacia es, sin embargo, sorprendente: puede amplificar una corriente 100 veces.





Dos fotocélulas de germanio comparadas con el tamaño de un fósforo. Debido a sus dimensiones, están reemplazando en muchas aplicaciones a las células fotoeléctricas comunes.

semiconductores, que tienen una curiosa propiedad: un semiconductor conduce bien la corriente cuando ésta lo atraviesa en un determinado sentido, pero prácticamente no la conduce si ésta lo atraviesa en sentido contrario. Son semiconductores el germanio, el selenio, el teluro, el silicio, el óxido de cobre, el óxido de manganeso, el óxido de cobalto, el óxido de níquel, la galena, etc.

Naturalmente, los semiconductores se emplean mucho en la rectificación de corriente alterna, y así son muy comunes los rectificadores de selenio, de óxido de cobre, de germanio (llamados díodos de germanio). Si en un circuito de CA se intercala un semiconductor, éste sólo deja pasar el impulso de corriente en un sentido y bloquea el impulso opuesto.

Otra propiedad notable de algunos semiconductores, como el germanio, es que amplifican notablemente la corriente, hasta en la relación 100 a 1. Se construyen así los llamados *transistores* que están reemplazando en muchas aplicaciones a las válvulas electrónicas amplificadoras, especialmente porque se los puede construir de muy pequeño tamaño (hasta del tamaño de un fósforo).

El germanio y el selenio poseen además la propiedad de que su resistencia eléctrica disminuye apreciablemente cuando se los ilumina; aprovechando esta propiedad se construyen fotocélulas con múltiples aplicaciones.

Conexión de aparatos en serie

Varios aparatos están conectados en serie cuando toda la corriente atraviesa a cada uno de ellos. Ya hemos visto que los amperímetros se conectan en serie.

Muchas veces es necesario calcular la resistencia total de varios aparatos conectados en serie. Es fácil probar que esa resistencia –que llamaremos R_s– es igual a la suma de las resistencias conectadas.

En efecto,

$$V_{AB} = I\,R_1$$
$$V_{BC} = I\,R_2$$
$$V_{CD} = I\,R_3$$

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = I\,(R_1 + R_2 + R_3); \quad \text{pero} \quad V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = V_{AD}$$
$$V_{AD} = I\,(R_1 + R_2 + R_3) \qquad (1)$$

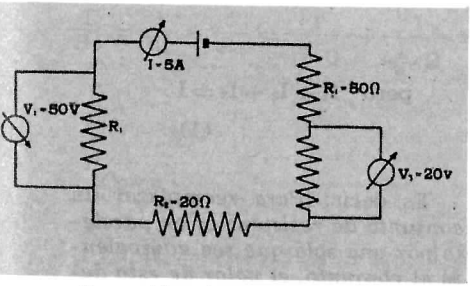
Si se desea reemplazar las tres resistencias por una sola, de modo que el circuito no se modifique (lo que significa que deberá circular la misma I y producirse la misma caída de tensión entre A y D), deberá ser:

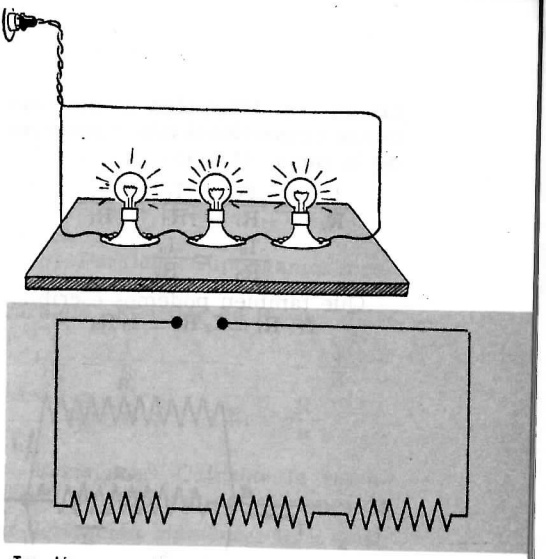
$$V_{AD} = I\,R_s$$

De acuerdo con (1):

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

EJEMPLO: *Calcular la resistencia total del conjunto de resistencias del circuito de la figura siguiente:*





Tres lámparas conectadas en serie, y el esquema simbólico de las mismas.

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

pero

$$R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{50\ V}{5\ A} = 10\ \Omega$$

$$R_3 = \frac{V_3}{I} = \frac{20\ V}{5\ A} = 4\ \Omega$$

$$R_s = 10\ \Omega + 20\ \Omega + 4\ \Omega + 50\ \Omega = 84\ \Omega$$

Conexión de aparatos en paralelo o derivación

Mucho más común que la conexión en serie es la llamada conexión en *derivación* o *paralelo*. En una instalación domiciliaria, todos los aparatos están en derivación. Una razón es que si, por ejemplo, se los conecta en serie y uno se quema, la corriente se interrumpe en todos, lo que no ocurre si están conectados en derivación, porque, en este caso, por cada rama pasa una determinada intensidad.

La intensidad de la corriente que entra en una derivación se divide en tantas partes como ramas haya, y la suma de las intensidades parciales es igual a la intensidad que entra.

Es decir:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

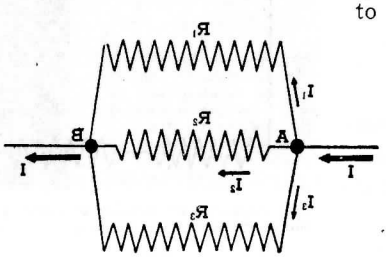
¿Cómo se reparten las intensidades por las ramas? Se comprueba que por la rama de menor resistencia va la máxima intensidad: la intensidad que recorre una ra-

ma de una derivación es inversamente proporcional a la resistencia de la rama. O sea:

$$\frac{I_1}{R_2} = \frac{I_2}{R_1} \; ; \; \frac{I_1}{R_3} = \frac{I_3}{R_1} \; ; \; \frac{I_2}{R_3} = \frac{I_3}{R_2}$$

Que también podemos escribir:

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$$



Cada uno de esos productos es la diferencia de potencial entre los extremos de cada rama. Por lo tanto: *En una derivación la caída de tensión es la misma en todas las ramas.*

Podemos proponernos ahora el mismo problema de la conexión en serie: calcular la resistencia total, que llamaremos R_p, de un conjunto de resistencias en paralelo:

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_{AB}}{R_3}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = V_{AB}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right);$$

$$I = V_{AB}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)$$

pero $I_1 + I_2 + I_3 = I$ (1)

La R_p que debe reemplazar al conjunto debe ser tal, que

$$I = \frac{V_{AB}}{R_p};$$

que podemos escribir así:

$$I = V_{AB} \cdot \frac{1}{R_p}$$

De acuerdo con (1),

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Es decir: *Para reemplazar un conjunto de resistencias en paralelo por una sola que sea equivalente al conjunto, el valor de ésta debe ser tal que su recíproca sea igual a la suma de las recíprocas de las resistencias de la derivación.*

EJEMPLO: *Calcular la R_p del siguiente conjunto de resistencias en paralelo:* $R_1 = 4\,\Omega$; $R_2 = 3\,\Omega$; $R_3 = 0{,}01\,\Omega$.

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4\,\Omega} + \frac{1}{3\,\Omega} + \frac{1}{\frac{1}{100}\,\Omega} =$$

$$= (0{,}25 + 0{,}33 + 100)\,\frac{1}{\Omega} = 100{,}58\,\frac{1}{\Omega}$$

$$R_p = \frac{1}{100{,}58} = 0{,}009\,\Omega$$

OBSERVACIÓN: Como enseña este ejercicio, R_p es menor que 0,01 Ω, que es la menor de las resistencias de la derivación. Puede probarse que la R_p de un conjunto de resistencias conectadas en paralelo es menor que la menor de las resistencias del conjunto.

En efecto,

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Entonces,

$$\frac{1}{R_p} > \frac{1}{R_1} \therefore R_p < R_1$$

y si suponemos que R_1 es la menor de todas, R_p es menor que la menor.

CASO DE RESISTENCIAS IGUALES. *a) Serie.* Supongamos n resistencias iguales conectadas en serie. El valor de R_s es:

$$R_s = R + R + R + \ldots + R$$
$$R_s = n\,R$$

b) Paralelo. Supongamos n resistencias iguales conectadas en paralelo. El valor de R_p es:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \ldots + \frac{1}{R}$$
$$\frac{1}{R_p} = \frac{n}{R} \therefore R_p = \frac{R}{n}$$

EJEMPLOS: *Calcular la intensidad, en cada una de las ramas de la derivación siguiente:* $R_1 = \frac{1}{2}\ \Omega$; $R_2 = \frac{1}{6}\ \Omega$.

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{\frac{1}{2}\ \Omega} + \frac{1}{\frac{1}{6}\ \Omega} = (2+6)\ \frac{1}{\Omega} = 8\,\frac{1}{\Omega} \therefore$$

$$\therefore R_p = \frac{1}{8}\ \Omega = 0{,}125\ \Omega$$

Como

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I R_p \therefore I_1 = \frac{I R_p}{R} = \frac{5\ A \cdot \frac{1}{8}\ \Omega}{\frac{1}{2}\ \Omega} + \frac{10\ A}{8} = 1{,}25\ A$$

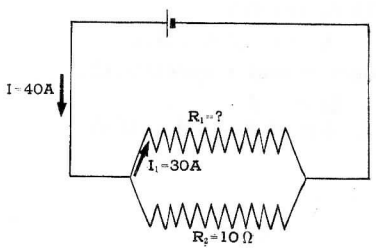
$$I = I_1 + I_2 \therefore I_2 = I - I_1 = 5\ A - 1{,}25\ A = 3{,}75\ A$$

Resolver el circuito siguiente:

$I_2 = I - I_1 = 40\ A - 30\ A = 10\ A$

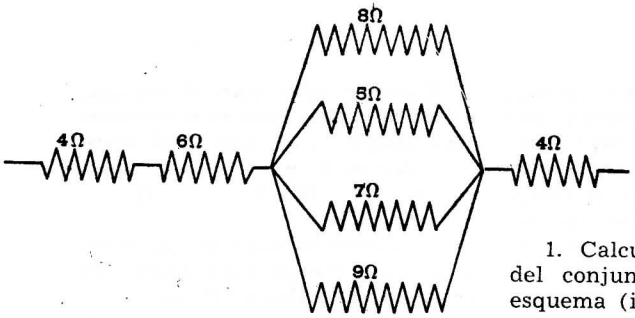
$V_{AB} = I_2 R_2 = 10\ A \cdot 10\ \Omega = 100\ V$

$R_1 = \frac{V_{AB}}{I_1} = \frac{100\ V}{30\ A} = 3{,}33\ \Omega$



Conexión mixta

Puede ocurrir que en un circuito haya resistencias conectadas en paralelo, conjuntamente con otras conectadas en serie. El cálculo de la resistencia total es sencillo, como lo demuestran los siguientes ejercicios:



Resistencias en conexión mixta.

1. Calcular la resistencia total del conjunto de resistencias del esquema (izquierda):

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{8\,\Omega} + \frac{1}{5\,\Omega} + \frac{1}{7\,\Omega} + \frac{1}{9\,\Omega} = \frac{1\,459}{2\,520}\ \frac{1}{\Omega}$$

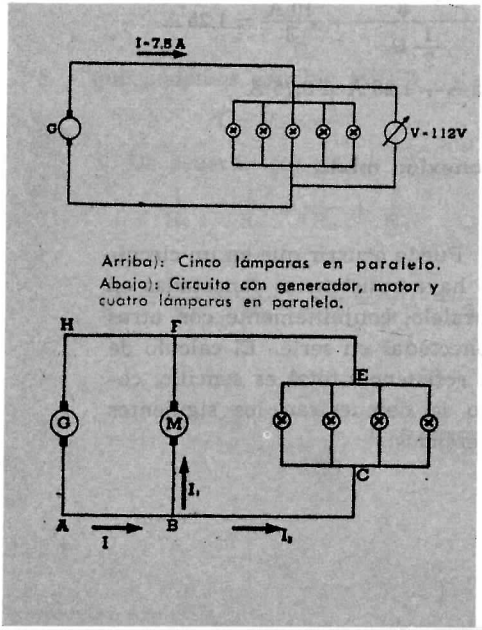
$$R_p = 1{,}7\ \Omega$$

$$R = 4\,\Omega + 6\,\Omega + 1{,}7\,\Omega + 4\,\Omega = 15{,}7\,\Omega$$

2. En el circuito de la primera figura (abajo) las 5 lámparas son iguales. ¿Cuál es la resistencia de cada lámpara y la intensidad de corriente que pasa por cada una?

Como las lámparas son iguales, la I se divide en *cinco* intensidades iguales, que llamaremos *i*. O sea:

$$i = \frac{I}{5} = \frac{7{,}5\ A}{5} = 1{,}5\ A$$



Arriba): Cinco lámparas en paralelo.
Abajo): Circuito con generador, motor y cuatro lámparas en paralelo.

Como 112 V es la diferencia de potencial en cada una de las lámparas, la resistencia de cualquiera de ellas vale:

$$R = \frac{112\ V}{1{,}5\ A} \cong 75\ \Omega$$

3. En el circuito de la segunda figura (abajo) G es un generador de 115 V de f.e.m., cuya resistencia interna es muy pequeña. El motor M necesita 12 A para funcionar y cada lámpara (son todas iguales) requiere 1,5 A; los conductores AB y FH tienen una resistencia de 0,2 Ω, y los BC y FE, 0,3 Ω. Calcular: *a)* la caída de tensión en cada conductor; *b)* la caída de tensión en el motor; *c)* las resistencias del motor y de cada lámpara:

$$I = I_1 + I_2$$

a) Como cada lámpara trabaja con 1,5 A, resulta

$$I_2 = 4 \cdot 1{,}5\ A = 6\ A$$

Como el motor necesita 12 A:

$$I_1 = 12\ A$$

$$\therefore\ J = 12\ A + 6\ A = 18\ A$$

Las caídas de tensión en las líneas AB y FH valen:

$V_{AB} = I \cdot R_{AB} = 18\ A \cdot 0{,}2\ \Omega$

$V_{AB} = 3{,}6\ V = V_{FH}$

Por lo tanto, la diferencia de potencial en los bornes del motor es:

$V_{FB} = 115\ V - (3{,}6 + 3{,}6)\ V$

$V_{FB} = 107{,}8\ V$

b) Luego, la resistencia del motor vale:

$$R_M = \frac{V_{FB}}{I_1} = \frac{107{,}8\ V}{12\ A} \cong 9\ \Omega$$

Las caídas de tensión en las líneas BC y EF valen:

$V_{BC} = I_2 \cdot R_{BC} = 6\ A \cdot 0{,}3\ \Omega = 1{,}8\ V$

$V_{BC} = 1{,}8\ V = V_{EF}$

Por lo tanto, la caída de tensión en las lámparas vale:

$V_{CE} = V_{FB} - (V_{BC} + V_{EF}) =$

$= 107{,}8\ V - (1{,}8 + 1{,}8)\ V = 104{,}2\ V$

c) Por lo tanto, la resistencia del conjunto de lámparas vale:

$$R_{CE} = \frac{104{,}2\ V}{6\ A}$$

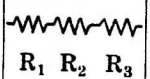
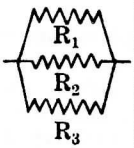
$R_{CE} = 17{,}3\ \Omega$

Pero ésta es la resistencia equivalente; por lo tanto, como las cuatro lámparas son iguales,

$$R_{CE} = \frac{R}{4} \quad \therefore \quad R = 4 \cdot R_{CE} = 69{,}2\ \Omega$$

que es la resistencia de cada lámpara.

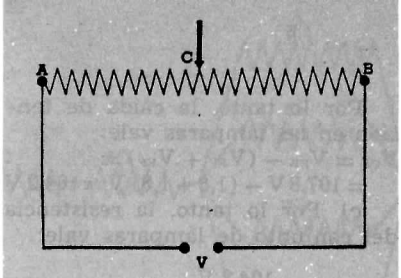
CUADRO COMPARATIVO DE LOS ACOPLAMIENTOS DE RESISTENCIAS

Conexión	*Esquema*	*Intensidad*	*Tensión*	*Resistencia equivalente*
SERIE	 $R_1\ R_2\ R_3$	La misma en todas las resistencias	Distinta en todas (salvo que las R sean iguales)	$R_s = R_1 + R_2 + R_3$
PARALELO	 R_1 R_2 R_3	Distinta en todas las resistencias (salvo que las R sean iguales)	La misma en todas	$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

Cómo obtener una diferencia de potencial variable: el potenciómetro

Para variar a voluntad la intensidad de corriente en un circuito se utiliza un reóstato. El aparato que permite realizar lo mismo con la tensión se llama *potenciómetro*, o *divisor de tensión* (figura de pág. siguiente).

Un potenciómetro es sencillamente un reóstato, conectado en la forma siguiente: entre A y B se aplica una cierta tensión V; enton-



Esquema de un potenciómetro o divisor de tensión.

ces, en los puntos comprendidos entre A y C la tensión puede tomar todos los valores comprendidos entre cero y V.

EJEMPLO: *Entre A y B se dispone de una tensión fija de 250 V. El aparato M tiene aplicados 120 V y circulan por él 2 mA. Se sabe que la resistencia del conductor AC vale 40 000 Ω. ¿Cuánto vale la resistencia de la rama CB?*

El aparato tiene una resistencia eléctrica:

$$R_x = \frac{120\ V}{0{,}002\ A} = 60\ 000\ \Omega$$

Calculemos la resistencia equivalente del conjunto R_{AC} y R_x:

$$\frac{1}{R_{//}} = \frac{1}{R_{AC}} + \frac{1}{R_x} = \frac{1}{40\ 000\ \Omega} + \frac{1}{60\ 000\ \Omega} = \frac{1}{24\ 000\ \Omega} \quad \therefore \ R_{//} = 24\ 000\ \Omega$$

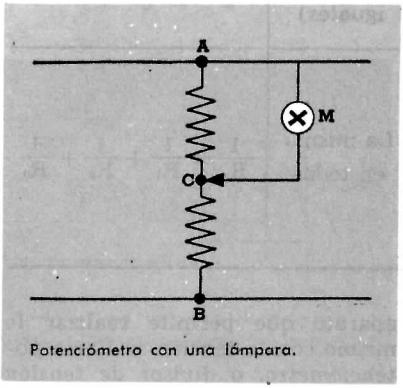
Por lo tanto, la intensidad total que circula por dicha conexión es:

$$I = \frac{120\ V}{24\ 000\ \Omega} = \frac{1}{200}\ A$$

Entre C y B hay una diferencia de potencial de:

$V_{CB} = V_{AB} - V_{AC} = 250\ V - 120\ V = 130\ V \ \therefore$

$$\therefore \ R_{CB} = \frac{V_{CB}}{I} = \frac{130\ V}{\frac{1}{200}\ A} = 26\ 000\ \Omega$$



Potenciómetro con una lámpara.

Si el cursor se aplica en B, en lugar de C, la tensión aplicada al aparato es 250 V. En cambio, si el cursor toca en A, no hay tensión aplicada al aparato.

Acoplamiento de generadores

a) Acoplamiento en serie. Supongamos que queremos proveer de agua al último piso de una casa de departamentos de 30 m de altura. Para elevar el agua disponemos de bombas aspirantes. Pero sabemos que esas bombas sólo pueden elevar el agua hasta una altura de unos 10 m. Con una sola bomba no se puede resolver el problema. Sin embargo se puede hacer llegar el agua hasta el último piso: instalamos una bomba al nivel del suelo, y con ella llenamos un tanque colocado a 10 m de altura. Ahí colocamos otra bomba, que

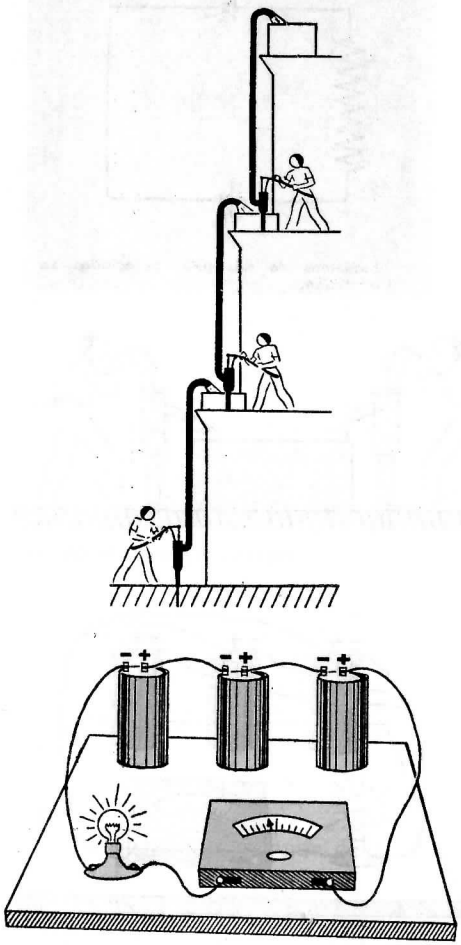
saca el agua de ese tanque y lo eleva hasta otro que está a 20 m de altura. Con otra bomba sacamos el agua de este tanque y la elevamos hasta otro que está sobre el techo del último piso, a 30 m del nivel del suelo.

Ninguna de las tres bombas podía por sí sola hacer llegar el agua tan arriba, pero las tres, conectadas a los tanques respectivos, la pueden elevar. Esta manera de conectar las bombas se llama *conexión en serie*.

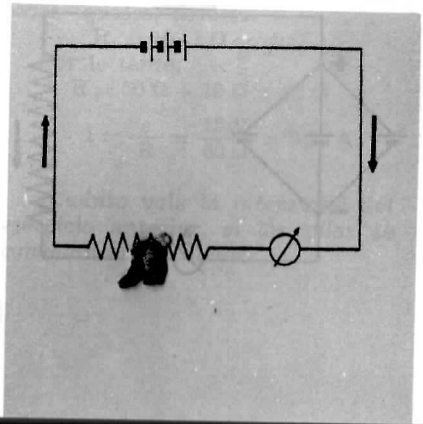
En electricidad se suelen presentar a menudo problemas semejantes. Puede suceder, por ejemplo, que sea necesario hacer circular una corriente de 2 A por un circuito de 3 Ω. ¿Cuánto debe valer la f. e. m.? Según la ley de Ohm:

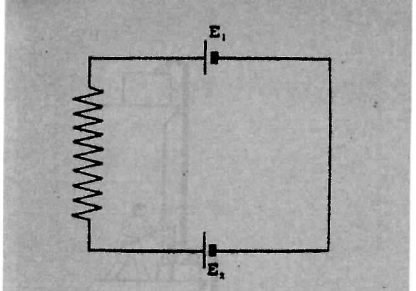
$$e = I \cdot R = 2\ A \cdot 3\ \Omega = 6\ V$$

Necesitamos una f. e. m. de 6 V. Supongamos que sólo tenemos pilas de 1,5 V. El problema del agua nos da una idea: en realidad, las pilas son como bombas eléctricas, que pueden elevar las cargas eléctricas hasta una cierta tensión, que para estas pilas vale 1,5 V. Siendo así, si conectamos el polo positivo de la primera pila con el negativo de la segunda, obtendremos entre el polo negativo de la primera y el positivo de la segunda, una diferencia de potencial de 3 V. Si conectamos el polo positivo de la segunda pila con el negativo de la tercera, ésta "recoge" las cargas que estaban a un potencial eléctrico de 3 V, y las eleva a un potencial de 4,5 V, como si fuera una bomba. Conectado el polo positivo de la tercera pila con el negativo de la cuarta, las cargas eléctricas alcanzan un nivel o po-

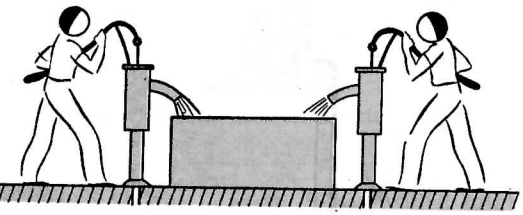


Conexión de tres pilas en serie y su esquema correspondiente.

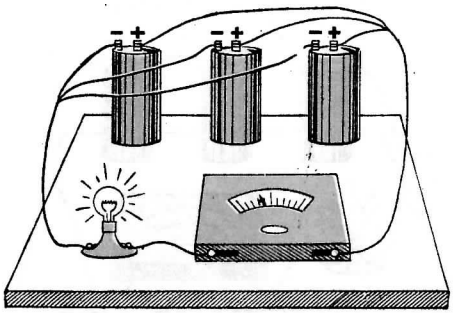




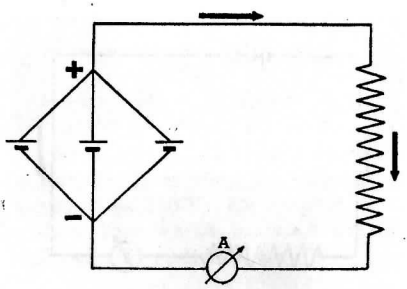
Esquemas de dos pilas conectadas en oposición.



Conexión de bombas en paralelo.



Conexión de tres pilas en paralelo y su esquema correspondiente.



tencial de 6 V. Hemos resuelto el problema *conectando las pilas en serie.* La fuerza electromotriz total de un conjunto de pilas conectadas en serie es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de cada generador.

b) Acoplamiento en oposición. Si en lugar de conectar el polo positivo de una pila con el negativo de la siguiente, lo conectamos con el positivo, es evidente que las fuerzas electromotrices actuarán una en "contra" de la otra, por lo cual la fuerza electromotriz total será ahora igual a la diferencia de las fuerzas electromotrices parciales.

Si las dos pilas tienen la misma f. e. m., la f. e. m. total vale cero.

c) Acoplamiento en paralelo. Imaginemos ahora otro problema hidráulico: queremos echar en un tanque 200 litros de agua por minuto, pero disponemos únicamente de bombas que echan 100 litros por minuto. Lo resolveremos de la siguiente manera: instalamos dos bombas como muestra la figura de arriba. Como cada una echa 100 litros por minuto, las dos juntas echan 200 litros por minuto, que es lo que queríamos. Esta manera de conectar las bombas se llama *conexión en paralelo* o *en cantidad.*

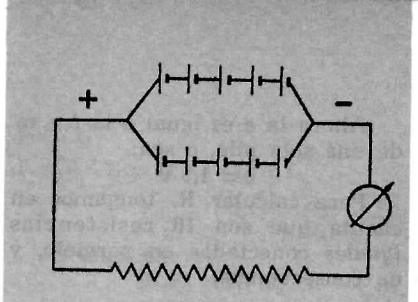
En electricidad se presentan problemas semejantes a éste. La conexión de varias pilas en paralelo se hace de la siguiente manera: se conectan entre sí todos los polos positivos de las pilas. El borne de unión será el de más alta tensión del circuito. Por otro

lado, se unen todos los polos negativos: el borne de unión será el de más bajo potencial del circuito.

No debe confundirse la conexión en paralelo con la conexión en oposición, aunque en ambas se unen los polos negativos entre sí, y los positivos también entre sí. La diferencia estriba en que conectados en oposición los generadores están como en serie, pero con sentidos opuestos, mientras que en la conexión en paralelo, el circuito que va a ser alimentado por las baterías se conecta a los bornes de unión de los polos.

Para que las pilas que constituyen la batería en paralelo no consuman parte de las energías que suministran, conviene que todas tengan la misma fuerza electromotriz. En tal caso la fuerza electromotriz del conjunto es igual a la fuerza electromotriz de uno de los generadores. Podría preguntarse qué se gana con conectar generadores en paralelo, puesto que la fuerza electromotriz que se consigue es la misma que la de un solo generador conectado. Sin embargo, obsérvese que a medida que se conectan pilas en paralelo, la resistencia de la batería va disminuyendo, pues las resistencias internas están en paralelo entre sí. En la conexión en serie, en cambio, la resistencia total aumenta, pues las resistencias internas de los generadores también están en serie.

Según el problema que se presente, conviene la conexión en serie o en paralelo. En general, conviene esta última si la batería va a trabajar en un circuito de pequeña resistencia externa. (¿Por qué?)



Conexión mixta.

d) Acoplamiento mixto. Hay una cuarta manera de conectar varias pilas. La figura representa dos grupos de pilas; en cada uno de ellos las pilas están conectadas en serie, mientras que un grupo está conectado en paralelo con el otro. Este tipo de conexión se llama *conexión mixta*, por ser una combinación de serie y paralelo.

EJEMPLOS: *Con 10 pilas de 1,5 V y 1 Ω de resistencia interna cada una, se forma una batería-serie con la que se alimenta una lamparita de 50 Ω de resistencia. ¿Qué intensidad circula por el circuito?*

$$I = \frac{e}{R}$$

La e es igual a la suma de todas las f. e. m.; pero como son todas iguales, resulta:

$$e = 10 \cdot 1{,}5\ V = 15\ V$$

Para calcular R, debe calcularse primeramente la resistencia interna de la batería. Como son todas iguales, resulta:

$$R_i = 10 \cdot 1\ \Omega = 10\ \Omega$$

Por lo tanto,

$$R = 50\ \Omega + 10\ \Omega = 60\ \Omega$$

$$\therefore\ I = \frac{e}{R} = \frac{15\ V}{60\ \Omega} = 0{,}25\ A$$

¿Cuánto vale la intensidad del ejercicio anterior, si las pilas se conectan en paralelo?

Ahora la e es igual a la f. e. m. de una sola pila, o sea:

$$e = 1{,}5 \text{ V}$$

Para calcular R_i tengamos en cuenta que son 10 resistencias *iguales* conectadas en paralelo, y en consecuencia,

$$R_i = \frac{1\ \Omega}{10} = \frac{1}{10}\ \Omega$$

Por lo tanto,

$$R = 50\ \Omega + 0{,}1\ \Omega = 50{,}1\ \Omega$$

$$\therefore\ I = \frac{e}{R} = \frac{15 \text{ V}}{50{,}1\ \Omega} \cong 0{,}30 \text{ A}$$

¿Cuál sería la intensidad, en el ejercicio anterior, si las 10 pilas se conectan en forma mixta, formando dos grupos de 5 pilas cada uno?

Cada grupo tiene una f. e. m. total:

$$e = 5 \cdot 1{,}5 \text{ V} = 7{,}5 \text{ V}$$

Pero ésta es también la f. e. m. total de la batería, pues los dos grupos están en paralelo entre sí.

Para calcular R_i calculamos la resistencia interna R'_i de cada grupo. Como son cinco resistencias iguales, en serie,

$$R'_i = 5 \cdot 1\ \Omega = 5\ \Omega$$

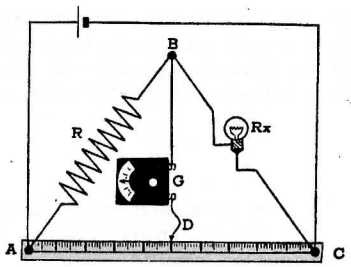
La resistencia interna de cada grupo vale 5 Ω; pero ambos grupos están en paralelo, por lo que:

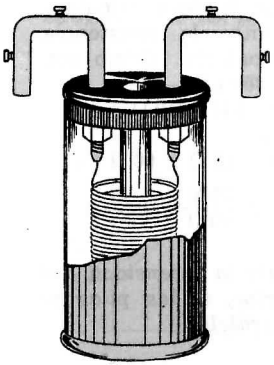
$$R_i = \frac{R'_i}{2} = \frac{5\ \Omega}{2} = 2{,}5\ \Omega$$

Entonces

$$R = 50\ \Omega + 2{,}5\ \Omega = 52{,}5\ \Omega$$

$$\therefore\ I = \frac{e}{R} = \frac{7{,}5 \text{ V}}{52{,}5\ \Omega} = 0{,}14 \text{ A}$$





Arriba): Esquema del **puente de hilo o puente de Wheatstone.** Izq.): Corte mostrando cómo está arrollada la resistencia patrón.

Medición precisa de una resistencia

Una resistencia eléctrica puede medirse con amperímetro y voltímetro: el amperímetro indicará la intensidad de la corriente que atraviese la resistencia, y el voltímetro, la caída de potencial que en ella se produce. El cociente entre ambos valores nos da la resistencia buscada.

Pero hay un método muy original y mucho más preciso, mediante el cual, midiendo longitudes, se mide una resistencia eléctrica. Para ello se utiliza el llamado *puente de hilo* o *puente de Wheatstone*. Éste consta de un galvanómetro sensible, una resistencia conocida y un hilo metálico –por ejemplo, de nicrome–, de sección *constante*, extendido sobre una regla graduada de 1 m. Se dispone el conjunto

en la forma que indica la figura, donde R es la resistencia conocida (cuando se quieren hacer medidas muy buenas, se usa una resistencia patrón) y R_x la resistencia que se quiere medir; en nuestro caso, la de una lámpara eléctrica. La intensidad suministrada por la pila se divide en el conjunto de resistencias, en la forma que indica la figura. Se mueve el cursor D sobre el hilo, hasta que el galvanómetro indique *cero*; se dice entonces que *el puente está en equilibrio*. Al equilibrar el puente, I_5 vale cero. Por lo tanto, B y D están al mismo potencial, pues no pasa corriente entre ambos. Por lo tanto:

$$V_{AB} = V_{AD}, \text{ o sea: } I_1 R_1 = I_3 R_3$$
$$V_{BC} = V_{DC}, \text{ o sea: } I_2 R_2 = I_4 R_4$$

Dividiendo miembro a miembro:

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_4 R_4}$$

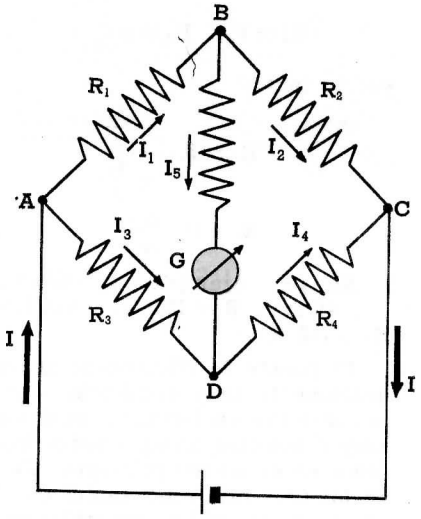
pero si

$I_5 = 0$, $I_1 = I_2$, e $I_3 = I_4$ $\therefore$

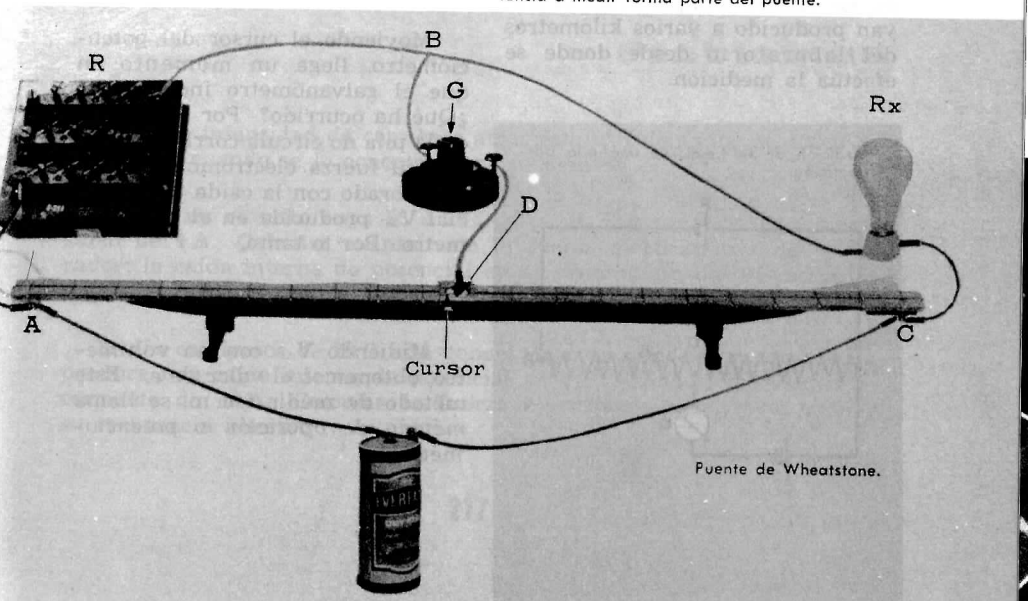
$$\therefore \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

O también:

$$R_1 R_1 = R_2 R_3$$



Esquema de un puente de Wheatstone. Obsérvese que en el pirómetro a resistencia la resistencia a medir forma parte del puente.



Puente de Wheatstone.

O como se suele decir: cuando el puente está en equilibrio, *los productos de las resistencias cruzadas son iguales.*

En nuestro puente de hilo,

$$R_1 = R; \quad R_3 = \varrho \frac{l_2}{s};$$

$$R_2 = R_x; \quad R_4 = \varrho \frac{l_1}{s};$$

por lo tanto:

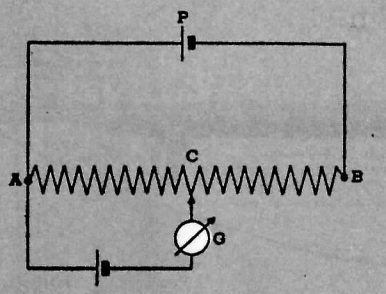
$$R_x = R \cdot \frac{\varrho \frac{l_1}{s}}{\varrho \frac{l_2}{s}}$$

$$\therefore R_x = R \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

Si, por ejemplo, $l_1 = 60$ cm; $l_2 = 40$ cm; $R = 100\ \Omega$; resulta $R_x = 150\ \Omega$.

El puente de Wheatstone es un instrumento muy empleado, y se lo construye en formas y modelos muy diferentes, aunque todos basados en el mismo principio. Uno de los usos más interesantes es el que se le da en las compañías telefónicas: con él se localizan fallas en las líneas, aunque ellas se hayan producido a varios kilómetros del laboratorio desde donde se efectúa la medición.

Medición de la f.e.m. de una pila por oposición.



Medición de la fuerza electromotriz de una pila

Esto parece muy sencillo: basta conectar un voltímetro a los bornes de una pila, y leer la escala... Pero no es así, porque como el circuito está alimentado por la propia pila, la corriente que circula produce una caída interna de potencial en la misma pila, caída que el voltímetro no mide. Recordemos que:

$$e = V_r + V_i = I R_r + I R_i$$

siendo R_r la resistencia propia del voltímetro, y R_i, la resistencia interna de la pila; el voltímetro mide V_r y no e como pretendíamos.

Hay que inventar un método en donde se pueda medir sin que la pila trabaje. La solución está en instalar un circuito como el de la figura, donde la pila P, cuya fuerza electromotriz buscamos, se conecta en *oposición* con el generador *e*.

Moviendo el cursor del potenciómetro, llega un momento en que el galvanómetro indica *cero*. ¿Qué ha ocurrido? Por el circuito de la pila no circula corriente, porque su fuerza electromotriz se ha equilibrado con la caída de potencial V_{AC} producida en el potenciómetro. Por lo tanto,

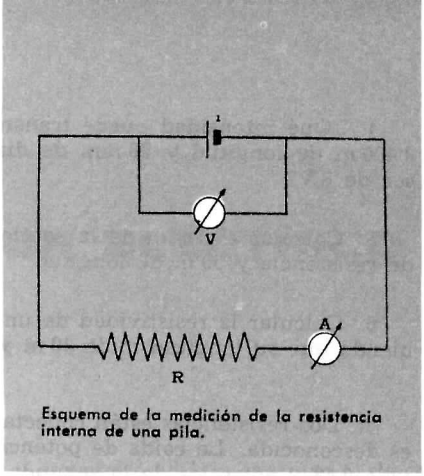
$$e = V_{AC}$$

Midiendo V_{AC} con un voltímetro, obtenemos el valor de e_x. Este método de medir f. e. m. se llama *método de oposición* o *potenciométrico.*

Cómo se mide la resistencia interna de una pila

Una vez medida la f. e. m. de la pila por el método de oposición, para medir su resistencia interna basta con instalar el circuito de esta figura, donde R es una resistencia conocida. Leyendo en el amperímetro la intensidad que circula, basta con aplicar la ley de Ohm:

$$I = \frac{e}{R + R_i} \quad \therefore \quad R_i = \frac{e - R\,I}{I}$$



Esquema de la medición de la resistencia interna de una pila.

EJEMPLO: *La f. e. m. de una pila vale 1,5 V; un amperímetro en serie con una resistencia de 0,2 Ω da una lectura de 5 A. ¿Cuál es la resistencia interna de la pila?*

$$R_i = \frac{e - R\,I}{I} = \frac{1{,}5\ V - 0{,}2\ \Omega \cdot 5\ A}{5\ A} = \frac{0{,}5\ V}{5\ A} = 0{,}1\ \Omega$$

Problemas

1. ¿Qué intensidad de corriente atraviesa un calentador de 100 Ω de resistencia cuando se lo conecta a una tensión de 220 V?

R.: 2,2 A

2. Por un circuito cuya $R_e = 10\ \Omega$ y su $R_i = 2\ \Omega$ circula una intensidad de 4 A. Calcular cuánto vale la fuerza electromotriz del generador; la caída interna de potencial en el generador y la diferencia de potencial utilizable entre bornes.

R.: 48 V; 8 V; 40 V

3. Un conductor de 20 Ω está conectado a un generador. En éste se produce una caída interna de potencial de 4 V, siendo la intensidad de corriente de 40 A. Calcular la fuerza electromotriz del generador y su resistencia interna.

R.: 804 V; 0,1 Ω

4. ¿Qué intensidad puede transmitirse por un alambre de cobre de 3 400 m de longitud y 28 mm de diámetro si la caída de tensión debe ser de 8 V?

R.: 85 A

5. Calcular el radio de la sección de un alambre de cobre de 50 Ω de resistencia y 50 m de longitud.

R.: 0,074 m

6. Calcular la resistividad de un alambre de 20 Ω de resistencia, sabiendo que su longitud mide 30 m y su sección 0,001 mm^2.

R.: 0,000 7 Ω $\frac{mm^2}{m}$

7. Dos resistencias están conectadas en serie. Una vale 0,1 Ω, la otra es desconocida. La caída de potencial entre los extremos de la primera vale 0,48 y entre los de la segunda 4,6 V. ¿Cuánto vale la segunda resistencia?

R.: 0,96 Ω

8. La resistencia equivalente a 10 lámparas iguales en paralelo vale 100 Ω. ¿Cuánto vale la resistencia de cada lámpara?

R.: 1 000 Ω

9. Una pequeña lamparilla para 6 V tiene, encendida normalmente, una resistencia de 20 Ω. ¿Con qué resistencia hay que conectarla en serie para que funcione normalmente con una batería de 8 V?

R.: 6,66 Ω

10. Una lamparilla para 220 V y 40 bujías consume 50 W. ¿Cuál es la intensidad de la corriente? ¿Ídem la resistencia de la lamparilla encendida? ¿Al precio de 0,25 $ el kWh, cuánto cuestan 100 bujías por hora?

R.: 0,277 A; 969 Ω; 0,03 $

11. Se conectan en serie 10 pilas de 1,95 V cada una y de 0,3 Ω de resistencia interna. Si se cierra el circuito con dos alambres en paralelo de 5 y 6 Ω de resistencia respectivamente, ¿qué intensidad circula por el circuito?

R.: 3,4 A

12. Con 15 pilas se forman tres grupos de cinco pilas cada uno, disponiéndolas en acoplamiento mixto. La resistencia interna de cada pila vale 0,4 Ω y se cierra el circuito con una resistencia de 6 Ω; la intensidad vale 0,5 A. ¿Cuánto vale la fuerza electromotriz de cada pila?

R.: 0,75 V

13. Un acumulador de 2 V de f. e. m. y una pila, de f. e. m. desconocida, se ponen uno a continuación de otro en un circuito que contiene además un reóstato y un amperímetro. Cuando se conectan los polos del acumulador y la pila de modo que las f. e. m. sean del mismo sentido, el amperímetro indica 350 mA; cuando se los conecta de modo que las f. e. m. sean opuestas el amperímetro indica 50 mA, siendo la corriente del mismo sentido que antes. Calcular la f. e. m. de la pila.

R.: 1,5 V

18 CALOR ELÉCTRICO

La ley de Joule

Hemos explicado que cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, éste experimenta un aumento de temperatura. Este efecto se denomina "efecto Joule".

El calentamiento no sólo se produce en los sólidos, sino también cuando la corriente atraviesa soluciones líquidas. Un ejemplo lo constituye la fabricación de aluminio por electrólisis: una intensa corriente (32 000 A) mantiene fundida (a 1 000° C) la solución que contiene al óxido de Al del cual se obtiene el metal.

Es posible calcular la cantidad de calor que puede producir una corriente eléctrica en cierto tiempo, por medio de la ley de Joule.

Recordemos que la *unidad de calor* es la *caloría*: 1 caloría es la cantidad de calor necesaria para que la temperatura de 1 gramo de agua suba 1° C. El *calor específico* de una sustancia representa la cantidad de calor necesaria para que la temperatura de 1 gramo de esa sustancia suba 1° C. Si una masa m de una sustancia de calor específico e aumenta su temperatura en Δt °C, la cantidad Q de calorías que ha recibido es:

$$Q = c\, m\, \Delta t$$

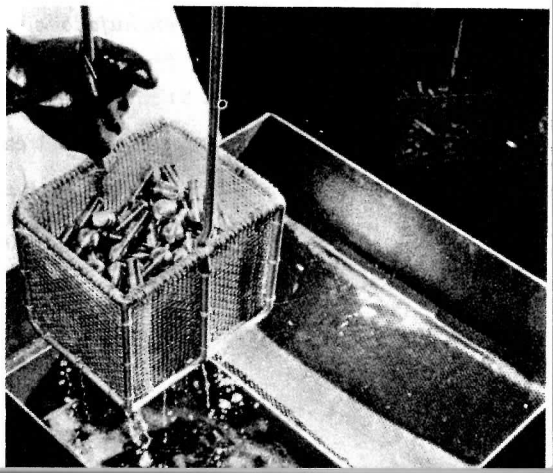
Como el calor es una forma de la energía, Joule encontró la famosa relación de equivalencia entre el calor y el trabajo, probando que cuando el trabajo se convierte íntegramente en calor, por cada joule de trabajo transformado se obtiene 0,24 cal. Es decir:

$$1 \text{ J} = 0{,}24 \text{ cal},$$

y también:

$$427 \text{ kgm} = 1\,000 \text{ cal}$$

Pernos bañados en preparados anticorrosivos. (Foto L. Bryce.)



Supongamos, como en un calentador eléctrico, que todo el trabajo realizado por la energía eléctrica es transformado en calor. Si el calentador funciona con un voltaje V y una intensidad I durante un tiempo t, el trabajo realizado es:

$$W = V\,I\,t,$$

y como cada J equivale a 0,24 cal, la cantidad de calor obtenido será:

$$Q = 0{,}24\,W,$$

o sea:

$$\boxed{Q = 0{,}24\,V\,I\,t}$$

(Ley de Joule.)

V debe medirse en volts, I en amperes y t en segundos, para que el resultado esté expresado en calorías.

Además, como

$V = R\,I$ (ley de Ohm),

resulta

$$Q = 0{,}24\,R\,I^2\,t$$

Ley de Joule

El calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor, es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y al tiempo que dura la corriente.

EJEMPLOS: *Por un calefón eléctrico pasa una corriente de 15 A. Está conectado a la línea (220 V) y el kWh vale 5 $. ¿Qué cantidad de calor se produce en media hora? ¿Cuánto cuesta darse un baño de media hora?*

a) $Q = 0{,}24\,V\,I\,t = 0{,}24\,\frac{cal}{J} \cdot 220\ V \cdot 15\ A \cdot 1\,800^s = 1\,425\,600\ cal.$

b) $W = V\,I\,t = 220\ V \cdot 15\ A \cdot 0{,}5^h = 3\,300\ W \cdot 0{,}5^h = 3{,}3\ kW \cdot 0{,}5^h = 1{,}65\ kWh$

GASTO: $1{,}65\ kWh \cdot 5\,\frac{\$}{kWh} = 8{,}25\ \$$

Con un calentador eléctrico de 500 W se desea hacer hervir 10 litros de agua, que están a una temperatura de 20° C. ¿Cuánto tiempo habrá que tener enchufado el calentador, si todo el calor que en él se produce pasa directamente al agua?

La cantidad de calor necesaria para hacer hervir los 10 litros es:

$$Q = c\,m\,\Delta t = 1\,\frac{cal}{g\,°C} \cdot 10\,000\ g \cdot 80°\ C = 800\,000\ cal$$

Esa cantidad se desprende del calentador en un tiempo t:

$$Q = 0{,}24\,V\,I\,t \;\therefore\; t = \frac{Q}{0{,}24\,V\,I} = \frac{Q}{0{,}24\,P}$$

$$t = \frac{800\,000\ cal}{0{,}24\,\frac{cal}{J} \cdot 500\ W} = \frac{800\,000}{0{,}24 \cdot 500} \cdot \frac{cal}{\frac{cal}{J} \cdot \frac{J}{s}} = 6\,666^s = 1^h\,51^m\,06^s$$

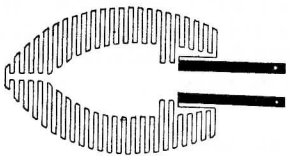
Aplicaciones del efecto Joule

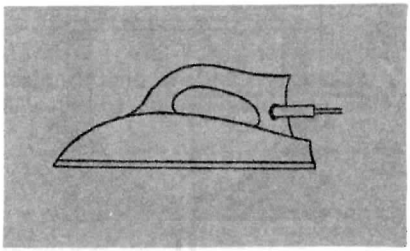
Los artefactos eléctricos destinados a producir calor, como los calentadores, estufas, cocinas, hornos, etc., son aplicaciones muy difundidas de este efecto. Como resistencias de calentamiento suele usarse una aleación especial, llamada *nichrome*, compuesta de hierro, níquel, cromo y manganeso, que presentan dos ventajas apreciables sobre las viejas resistencias de hierro: no se oxidan y su resistividad es 10 veces superior. En las cocinas eléctricas, para que las pérdidas se reduzcan al mínimo, conviene que el fondo de la vajilla sea plano o levemente cóncavo. Los calefones eléctricos consisten en un depósito metálico aislado térmicamente, estando el elemento de calefacción contenido en un cilindro. En serie con dicho elemento hay un termóstato que corta la corriente cuando la temperatura del agua llega a un valor predeterminado (generalmente 85° C).

La soldadura eléctrica por resistencia está muy difundida; su principio es muy sencillo: cuando se hace pasar una intensidad suficiente por la unión de un metal contra otro, si la temperatura alcanza el valor necesario se produce la fusión de los metales y las dos piezas se unen. Para obtener un buen resultado, deben regularse con cuidado todos los factores; las mejores soldaduras son las de dos piezas de metal de igual forma y espesor, de la misma resistencia eléctrica y del mismo punto de fusión. Cuando la soldadura se realiza en puntos aislados, se llama *soldadura por puntos*; cuando los puntos se encuentran muy cerca uno del otro, se realiza la *soldadura por costura.*

Operario soldador reparando un barco en los astilleros de la Isla Maciel (Buenos Aires).

Forma en que está dispuesto el elemento calefactor de una plancha eléctrica.



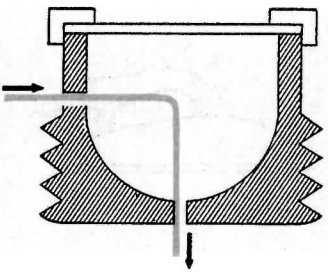


La lucha contra el efecto Joule

El efecto Joule encuentra múltiples aplicaciones prácticas (calentadores, planchas, luz eléctrica, etc.), pero a veces resulta perjudicial. Por ejemplo, en la transmisión de energía eléctrica se debe tratar de que la producción de calor sea mínima, por cuanto sólo representa energía perdida. Por ello se emplean alambres gruesos, de un material de alta conductividad; se trata de que los circuitos sean lo más cortos y directos posible; las uniones se realizan a presión, de modo que la resistencia en esos lugares sea pequeña.

Como la producción de calor en la transmisión puede llegar a aumentar excesivamente la temperatura, se acude a procedimientos especiales de refrigeración; por ejemplo, muchos aparatos eléctricos se sumergen en baños de aceite en circulación permanente; en otros, los conductores, en lugar de ser alambres, son tubos huecos, por cuyo interior circula agua. Tal ocurre con las grandes bobinas de las estaciones transmisoras de radio.

Corte de un fusible.



Cortocircuito y fusibles

Si la corriente circula constantemente por un circuito y produce calor, cabe preguntarse cómo es posible que la temperatura no aumente indefinidamente, puesto que los conductores están recibiendo calor continuamente. Lo que pasa es que, si bien reciben continuamente calor, también continuamente lo pierden, entregándolo al exterior. Al principio reciben más de lo que pierden, y la temperatura aumenta, pero llega un momento en que se alcanza un estado estacionario, llamado estado de régimen (véase cap. "Transmisión del calor", tomo I), en que todo el calor que recibe lo entrega al exterior, y de ahí que la temperatura no siga aumentando.

¿Qué pasaría si por una circunstancia cualquiera la intensidad de la corriente aumentara bruscamente? Siendo la cantidad de calor recibida por el conductor mayor que la que pierde, la temperatura de éste aumentaría rápidamente y podría llegar a quemar la envoltura e inclusive producirse un incendio. Eso sucede cuando, por defectos de aislación, se ponen en contacto dos cables eléctricos, produciéndose un cortocircuito.

El peligro que representa un cortocircuito se puede evitar intercalando un trocito de alambre de un metal cuyo punto de fusión sea bajo. Al producirse el cortocircuito, el alambre se funde y el paso de la corriente se interrumpe.

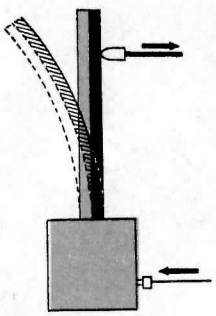
Estos trocitos de alambre se llaman *fusibles*, y son, generalmente, de plomo. Están colocados en un tubo aislador –generalmen-

te de porcelana–, y es muy sencillo cambiarlos cuando se han fundido. Los fusibles se construyen de secciones diferentes, y llevan marcada la corriente máxima que pueden admitir (5 A, 10 A, etc.). Por supuesto que los fusibles se conectan siempre en serie en el circuito que se quiere proteger; en las instalaciones domésticas va conectado un fusible con cada polo de la línea.

Como ya hemos dicho, la instalación eléctrica de una casa se hace mediante circuitos en paralelo, cada uno lleva un par de fusibles, y el conjunto de todos ellos se coloca en una caja metálica, cerca de donde entran en la casa los alambres alimentadores.

Termostatos

Los termostatos son aparatos destinados a regular la temperatura, interrumpiendo la corriente cuando aquélla ha superado un cierto valor prefijado. Un termostato consiste generalmente en dos tiras de diferentes metales, soldadas o unidas formando una sola pieza. Ambos metales tienen coeficientes de dilatación distintos, de modo que al ser calentados, uno se dilata más que el otro y, por lo tanto, el conjunto se dobla en el sentido del metal de menor coeficiente. Entonces el contacto se interrumpe; cuando el conjunto se enfría, recobra la posición inicial y el contacto se restablece. Los termostatos se emplean para regular la temperatura de habitaciones, colchas eléctricas, etc. En los letreros luminosos, sirven de interruptores, abriendo y cerrando el circuito.

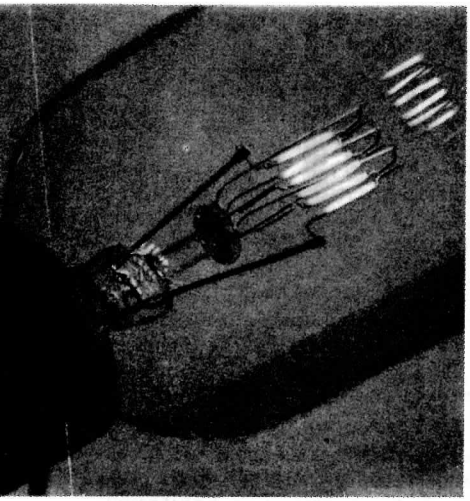


Termostato.

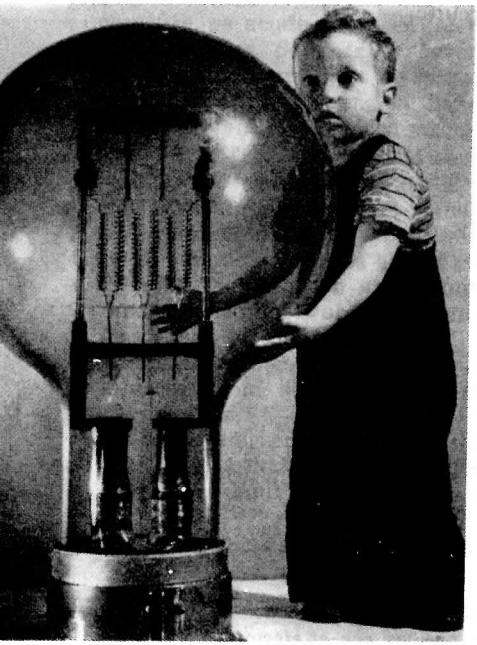
Iluminación eléctrica*

Si por un alambre circula corriente, éste se calienta, y si la intensidad es grande, la temperatura puede ser muy elevada. Si su temperatura de fusión es baja, el alambre funde fácilmente, como en los fusibles, pero si la temperatura de fusión es alta, el alambre podrá ponerse incandescente, es decir se hará luminoso. El alambre pasa por una serie de después rojo brillante, más tarde anaranjado y finalmente rojo

* En este parágrafo sólo nos referiremos a la iluminación por incandescencia, dejando el estudio de los tubos fluorescentes para más adelante (capítulo 27), pues se basan en un principio que nada tiene que ver con el efecto Joule.



Lámpara de filamento de tungsteno.



Esta es la más gigantesca lámpara de filamento que se haya fabricado hasta ahora; su potencia es de 50 000 W.

blanco. Éste es el fundamento de la lamparilla eléctrica, inventada por Tomás A. Édison.

Al principio Édison se encontró con una gran dificultad: el alambre se ponía luminoso; pero casi en seguida se quemaba. Pensó que si ponía el alambre dentro de una ampolla de vidrio y hacía el vacío, al no haber oxígeno no podría haber combustión, y el alambre quedaría encendido largo tiempo. Y así ocurrió: colocó el filamento dentro de una bombita de vidrio, hizo el vacío, aplicó corriente eléctrica y la bombilla iluminó.

Otro problema para Édison consistía en el material empleado para el filamento. Ensayó platino, que era el metal de más alto punto de fusión conocido en su época (1 760° C), pero no dio resultado, por cuanto para obtener luz blanca había que trabajar a una temperatura demasiado próxima a la del punto de fusión, lo que no era práctico. Ensayó miles de filamentos distintos hasta que dio con el filamento carbónico, con el cual realizó –en 1879– la primera lamparita realmente práctica.

Actualmente se emplean filamentos metálicos de *tungsteno*, que es el metal de más alto punto de fusión (3 395° C), encerrado en ampollas en las que se ha efectuado el vacío y puesto una pequeña proporción de un gas inerte llamado argón. Este último adelanto se debió a lo siguiente: en las lamparitas anteriores se usaba filamento de tungsteno y se hacía el vacío en ella. Pero a la temperatura de incandescencia, el tungs-

teno se volatiliza y se deposita poco a poco sobre las paredes de la bombilla, ennegreciéndola. Llegaba un momento en que la bombilla no alumbraba más. Eso es lo que evita el argón, que por ser uno de los llamados gases nobles, no entra en combinación con el tungsteno, y al estar a una cierta presión (muy baja, de todas maneras) hace mucho más lenta la volatilización del filamento. También a éstos se les da ahora formas especiales, entre las que se destaca por su originalidad y eficiencia el llamado filamento "duospiral", que consiste en una espiral arrollada a su vez en forma de espiral. Todos estos adelantos han conseguido un gran rendimiento en las lámparas actuales, que son 6 veces más eficaces que las de la época de Édison.

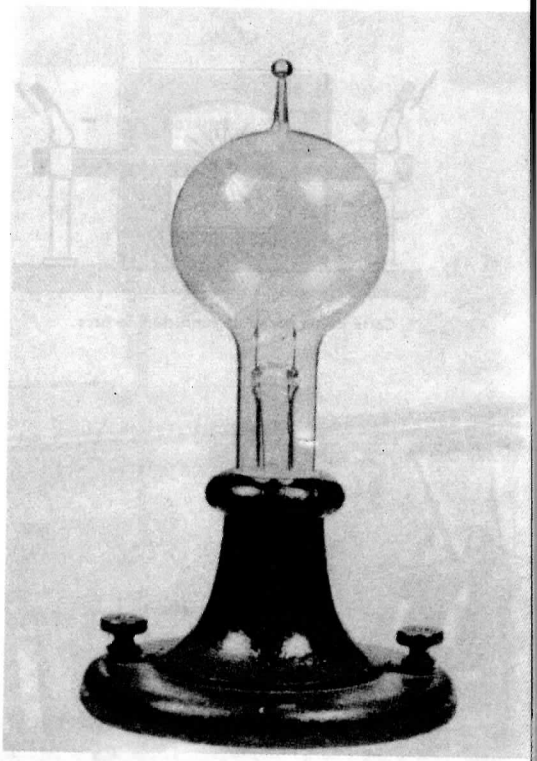
En muchas industrias –fotografía, estudios cinematográficos, etc.– se requieren lámparas de gran intensidad luminosa; eso se consigue reduciendo la vida de las lámparas, que en las comunes es de unas 1 000 horas. Así, por ejemplo, las enormes lámparas que se emplean en la filmación de películas sólo duran dos horas.

Por último, digamos que en las lámparas incandescentes sólo de un 5 al 10 % de la energía entregada se transforma en luz; el resto se transforma en calor.

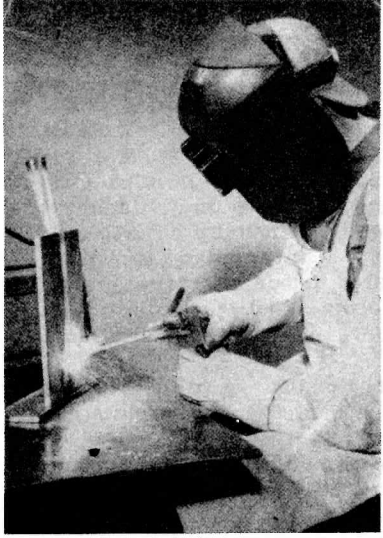
Arco eléctrico

El físico Humprey Davy descubrió, a principios del siglo pasado, que si se juntan dos carbones que están a una diferencia de potencial de 50 ó 100 volts, al separarlos se establece entre ellos un arco eléctrico muy luminoso, al que dio el nombre de *arco voltaico*. La intensidad luminosa del arco puede ser muy grande –alrededor de 50 000 bujías– y la temperatura alcanza hasta unos 4 000° C.

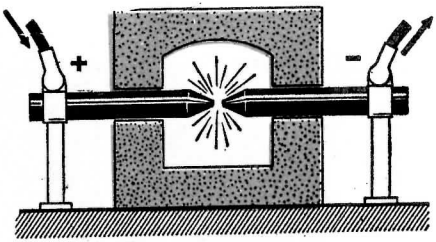
En realidad, se trata también de una lámpara de incandescencia, ya que la mayor parte de la luz proviene de los extremos incandescentes de los carbones. Suministra una luz muy blanca y brillante, con gran cantidad de ra-



Lámpara eléctrica construida por Édison.



Aparato de soldadura de arco.

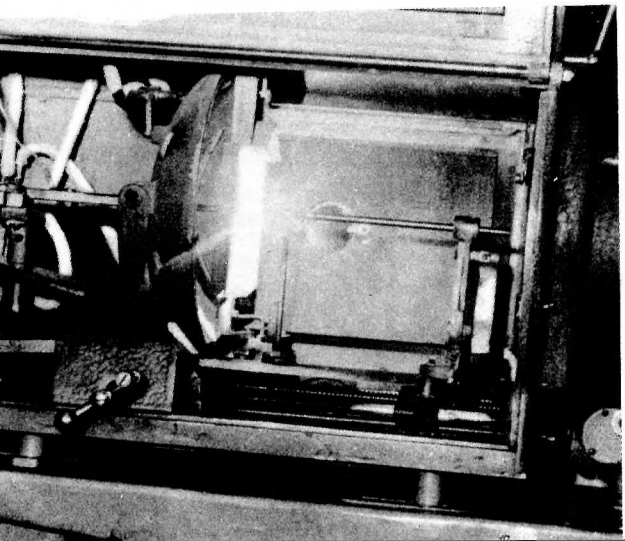


Corte de un horno de fundición de arco.

yos ultravioletas, por lo cual lo emplean los médicos para dar baños de sol artificial. Por estos rayos ultravioletas –dañinos para el ojo humano– no debe nunca mirarse directamente la luz del arco, sino con anteojos oscuros.

En el arco es observable la migración de electrones que conducen la corriente. En efecto: para encender la lámpara, primero se ponen en contacto los carbones, y luego se los separa, formándose así el arco; la distancia entre los carbones debe ser controlada, para lo cual hay que ir modificando la posición a medida que ellos se consumen. Al cabo de un cierto tiempo se observará que en el carbón negativo se produce un pozo, mientras que en el positivo se levanta una prominencia. La interpretación moderna es que los electrones son emitidos por el carbón negativo, y de ahí que éste se gaste. Si el arco se conecta a corriente alterna, ambos carbones se consumen igualmente.

Las lámparas de arco se emplean actualmente en la iluminación teatral, en los proyectores



Arco de un proyector cinematográfico.

cinematográficos, en grandes reflectores, en la *soldadura de arco* o *eléctrica*, y en el horno eléctrico de *fundición* a arco.

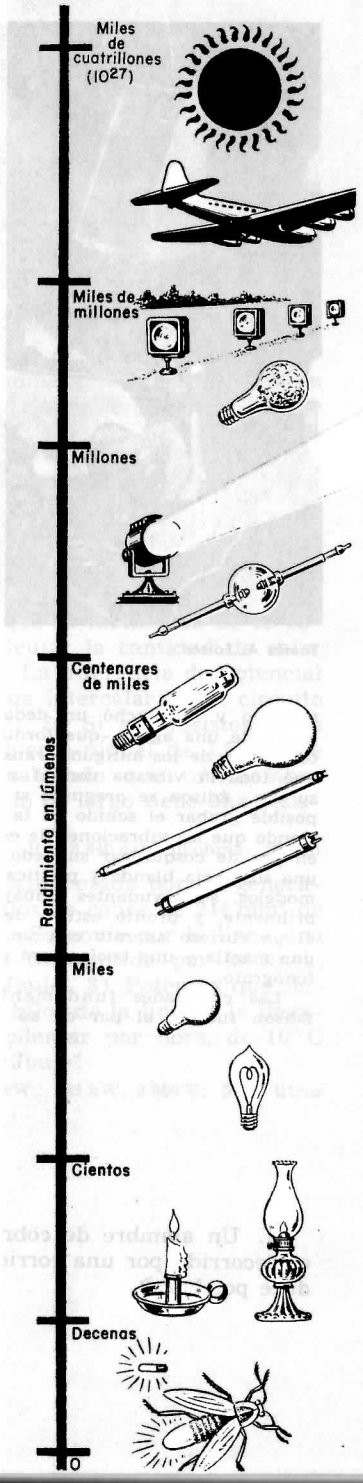
La soldadura de arco utiliza la elevada temperatura producida. La pieza que se va a soldar forma un *electrodo*, y el otro es la varilla de metal, que se va fundiendo junto con la parte necesaria de la pieza.

Tomás Alva Édison

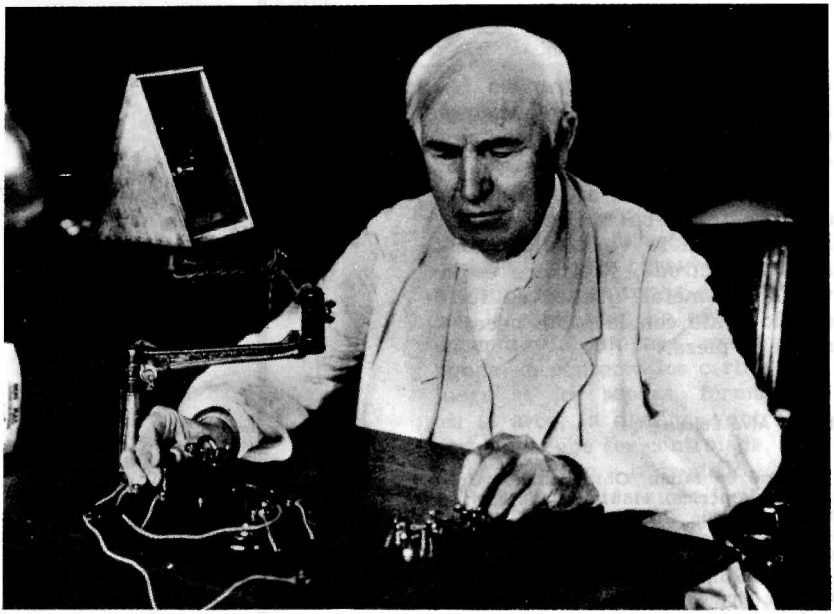
Nació en Milán, Ohio, Estados Unidos de América, el 11 de febrero de 1847, y falleció en 1931, después de haber patentado más de 3 000 inventos. Si bien no fue un hombre de ciencia en el sentido de un Galileo o de un Einstein, fue un técnico de gran imaginación y sentido práctico, que, con justicia, mereció ser llamado "El Mago de Menlo Park" (Menlo Park era el nombre de su residencia).

A los 12 años editó el *Weekly Herald* (Heraldo Semanal), con una imprentita que tenía instalada en un vagón de ferrocarril, que finalmente incendió en uno de sus experimentos, siendo exonerado inmediatamente. Trabajó luego como telegrafista, realizando rápidamente una serie de inventos, entre los que hubo uno que le dio fama, aunque no dinero: aniquilación de cucarachas mediante la electricidad.

Entre sus millares de inventos es muy conocida la historia respecto al fonógrafo. Se dice que jugueteando, cantaba ante la bobina transmisora de un



Éste es un espectro de producción de luz. Al tope se encuentra el Sol con un rendimiento de $30 \cdot 10^{27}$ lúmenes; al final la luciérnaga, con poca luz pero un gran rendimiento energético: transforma el 96 % de su energía en luz, lo que representa unos 500 lúmenes por W, muy superior a los 15 lúmenes por W que produce una lamparita eléctrica incandescente. En el espectro se destacan las lámparas de aeropuerto, que son lámparas especiales en las que la luz se produce por descarga en gas criptón; su rendimiento es de unos 50 millones de lúmenes. También ocupan lugar destacado las lámparas "foto-flash" de uso en fotografía, con 5 millones de lúmenes.



Tomás A. Édison.

teléfono y se pinchó un dedo con la punta de una aguja –que formaba parte de uno de los antiguos transmisores– que todavía vibraba con el sonido de su voz. Édison se preguntó si no sería posible grabar el sonido de la voz, haciendo que las vibraciones de esa punta, en vez de cosquillear su dedo, picaran una sustancia blanda y plástica. Diseñó modelos, sus ayudantes trabajaron febrilmente, y pronto estuvo delante de él un curioso aparato con un cilindro, una manija y una bocina: era el primer fonógrafo.

Las cualidades fundamentales de Édison fueron, al par de su imaginación, su inagotable espíritu de trabajo, su tremenda energía y su sentido de la organización. Como ejemplo, baste recordar que construyó cincuenta máquinas parlantes hasta llegar al gramófono popular, gastando dos millones de dólares en los experimentos. Antes de hacer industrializable la lámpara de incandescencia, experimentó con las fibras de 6 000 plantas diferentes, hasta que encontró el bambú; luego estudió 1 200 clases de bambúes, aprovechando los envíos que le hacían sus ayudantes desde Sudamérica y Oriente, y los que le facilitaba su propio botánico, de origen japonés.

Problemas

1. Un alambre de cobre de 2 mm^2 de sección y 100 m de longitud es recorrido por una corriente de 4 A. ¿Qué cantidad de calor se produce por hora?

R.: 11 750 cal

2. Una lámpara de incandescencia de 550 ohms de resistencia consume 0,4 A. ¿Cuántas lámparas de este consumo se podrán mantener encendidas durante 20 minutos con una energía eléctrica equivalente a 270 000 kgm?

R.: 25

3. A 220 V, la potencia de un calentador es de 440 W. ¿Durante cuánto tiempo habrá que tenerlo funcionando para hervir 2 litros de agua que están a 20° C? (Se admite que todo el calor producido se emplea en calentar solamente el agua.)

R.: 152ª

4. Un calorímetro de latón (calor específico del latón 0,094 cal/gC°) que pesa 200 g, contiene 500 g de agua, y sumergida en ella hay una resistencia de 10 ohms recorrida por una corriente de 1 A. ¿Cuánto se eleva la temperatura del agua en 5 minutos?

R.: 1,38° C

5. El pasaje de corriente por un hilo de 8,4 ohms, que está en un calorímetro que contiene 200 g de agua, eleva la temperatura del agua en 6° C en 12 minutos. ¿Cuál es la intensidad de la corriente?

R.: 0,9 A

8. Una lámpara de incandescencia está conectada a una diferencia de potencial de 120 V; un amperímetro indica que la intensidad de la corriente por la lámpara es de 0,5 A: 1) Calcular la cantidad de calor producida por la lámpara en 10 minutos; 2) La diferencia de potencial aumenta a 125 V. ¿Qué resistencia habrá que intercalar en el circuito para que la lámpara funcione como antes?; 3) Si esa resistencia se construye con un hilo de una aleación de hierro-níquel de 1,5 mm de diámetro; calcular la longitud necesaria, sabiendo que un alambre de hierro-níquel de 1 mm de diámetro y de 1 m de largo tiene una resistencia de 1 ohm.

R.: 8 640 cal; 10 ohms; 22,5 m

7. Una línea de transporte de energía es alimentada por un generador de 3 000 V. La línea se compone de 2 hilos de cobre de 244 mm² de sección; la distancia de transporte es 2,5 km. Se envía por la línea una corriente de 400 A. Calcular: 1) Potencia transmitida por la línea; 2) Potencia perdida en la línea por efecto Joule; 3) Potencia que llega; 4) Diferencia de potencial entre los dos hilos de la línea a la llegada; 5) ¿Qué cantidad de agua se podría calentar por hora, de 10° C a 100° C, con la energía perdida por efecto Joule?

R.: 1 200 kW; 557 kW; 643 kW; 2 860 V; 5 347 litros

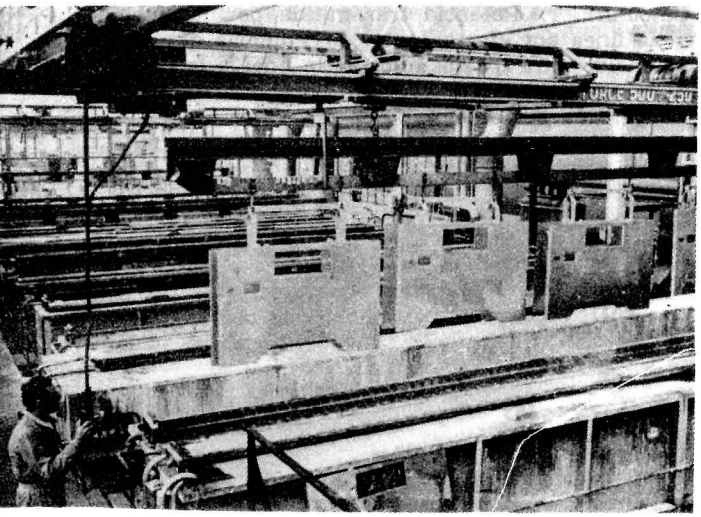
19 NOCIONES DE ELECTROQUÍMICA

La electrólisis

Ya hemos explicado en qué consiste el llamado efecto químico de la corriente, y para demostrarlo hemos realizado una experiencia: en una cuba que contiene agua acidulada con ácido sulfúrico (10 %, aproximadamente), sumergimos los extremos A y C de dos alambres conductores (preferiblemente de platino, o si no, dos chapitas de plomo), conectados con los polos de una pila. Al cerrar la llave L se observa tanto en A como en C que se desprenden burbujas de gas.

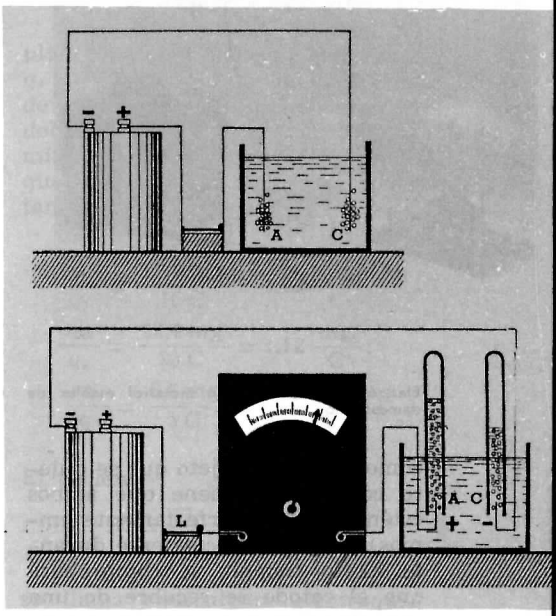
a) ¿Hay verdaderamente circulación de corriente, o el fenómeno se produce por el solo hecho de la conexión de A y C con una pila? La pregunta es interesante porque el agua *pura* no conduce la corriente eléctrica.

b) ¿De qué naturaleza son las burbujas de gas que se desprenden? Para responder a estas preguntas debemos experimentar con un poco más de cuidado: agregamos al circuito una lamparita, o un galvanómetro, que nos indicará si pasa o no corriente. Al cerrar la llave L, pasa la corriente. Como entre A y C no hay ningún alambre conductor, es indudable que el agua acidulada ha sido la conductora de la corriente eléctrica.



Baño electrolítico realizado en una industria metalúrgica.

Para responder a la segunda pregunta se han colocado en la cubeta, invertidos, los dos tubos de ensayo que se ven en la figura, llenos de agua. Cuando se cierra el circuito, las burbujas que se desprenden en A y C son recogidas en lo alto de los tubos, desalojando al propio tiempo al agua. La figura muestra el aparato después de cierto tiempo de circular la corriente: en el tubo de la derecha hay aproximadamente el doble volumen de gas que en el de la izquierda. Se puede reconocer que el gas que llena el tubo de la derecha es hidrógeno, retirando el tubo y acercando un fósforo encendido: se produce una pequeña explosión, porque él es combustible. El otro es oxígeno, lo que se comprueba introduciendo una pajita con la punta encendida: la combustión se aviva. Y como además, la proporción de cada gas es justamente la misma en que se encuentran en el agua (dos partes de hidrógeno por cada una de oxígeno), concluimos que *la corriente eléctrica descompone el agua en sus elementos químicos constitutivos.*

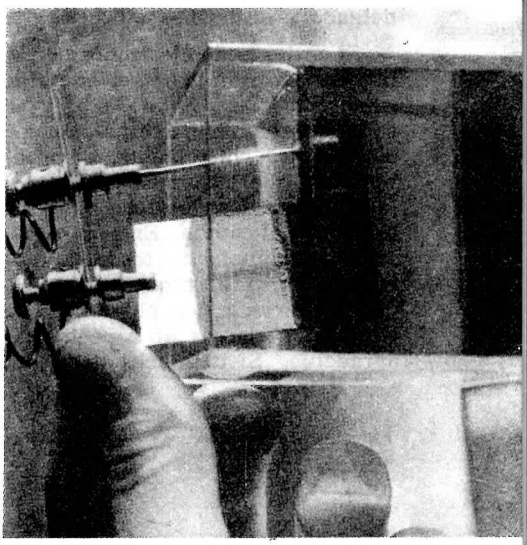


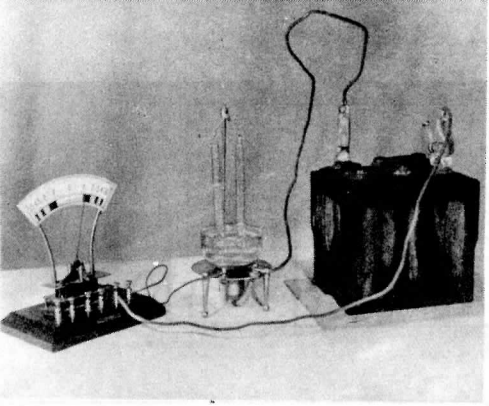
Este fenómeno se llama *electrólisis* del agua; la cuba en que se realiza se llama *cuba electrolítica*; los terminales A y C se denominan *electrodos*, llamándose *ánodo* al electrodo positivo, A, y *cátodo* al electrodo negativo, C.

¿Cómo se cobrea un objeto?

La corriente eléctrica actúa químicamente, no sólo sobre el agua acidulada, sino también sobre muchas soluciones, que se denominan *soluciones electrolíticas*. Así, si en una solución de sulfato de cobre al 5 %, como ánodo colocamos una barrita de cobre puro y

Cómo se recubre de cobre, durante la electrólisis, una chapa metálica.





Electrólisis realizada con material escolar de demostración.

como cátodo el objeto que se quiere cobrear (conviene que ambos estén pulidos y perfectamente limpios), al pasar la corriente durante cierto tiempo, se comprobará que el cátodo se recubre de una capa de cobre, aumentando en consecuencia de peso, mientras que el ánodo pierde cobre, y su peso disminuye. Lo notable de esas variaciones de peso, es que *el cátodo aumenta tanto como disminuye el ánodo.* Sucede como si durante la electrólisis la corriente eléctrica llevara cobre del ánodo al cátodo, recubriendo a éste de una capa delgada y uniforme.

Si en lugar de electrodos de cobre los usamos de otros metales, como oro, plata, cromo, etc., y en cada caso empleamos una solución electrolítica conveniente, comprobaremos que todo sucede como si la corriente transportara el metal del ánodo al cátodo. En esto se basa la *galvanoplastia* (dorado, plateado, cromado, niquelado, etc.), que preserva a los objetos de la oxidación y les da un aspecto más agradable. Si deseamos dorar un anillo de hierro, basta colocarlo en el cátodo, poner en el ánodo una barrita de oro, y usar como electrólito una solución de una sal de oro.

Conclusiones y problemas que se plantean

Esas experiencias nos llevan a estas conclusiones:

1) La corriente eléctrica no sólo se transmite en metales, sino también a través de algunos líquidos.

2) Si se disuelve en agua, un *ácido* (sulfúrico, clorhídrico, nítrico, etc.), una *sal* (cloruro de sodio o sal de cocina, sulfato de sodio, etc.) o una *base* (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, etc.) la solución así obtenida es *electrolítica,* es decir, conduce la corriente eléctrica.

Ahora se comprende por qué el agua de la canilla –que contiene sales– es conductora, mientras que el agua destilada es uno de los mejores aislantes. Conviene advertir además que también las sales fundidas conducen la corriente, mientras que la mayoría de las sustancias orgánicas (azúcar, por ejemplo) no forman soluciones electrolíticas. Otros líquidos que forman soluciones electrolíticas son la solución de amoníaco, el alcohol, la glicerina, etc.

3) La conducción electrolítica va acompañada siempre de reacciones químicas.

4) En la electrólisis de cualquier solución siempre ocurre que en el cátodo se deposita un metal, o se desprende hidrógeno.

Pero estas conclusiones van acompañadas de problemas igualmente importantes, cuya resolución será el objeto de este capítulo:

1) ¿Qué relación hay entre la *intensidad de corriente* empleada y *la cantidad* de sustancia depositada en los electrodos?

2) ¿Se cumple la ley de Ohm en la conducción electrolítica?

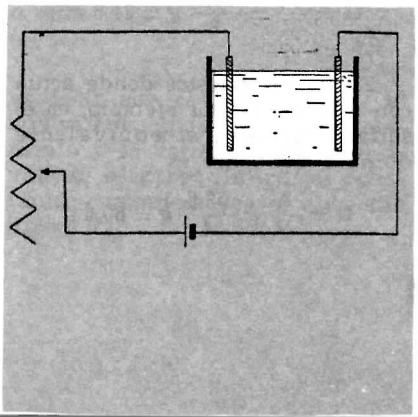
3) ¿Cómo se conduce la corriente en los electrólitos? ¿Como en los metales, es decir, mediante electrones libres, o por lo contrario, se trata de un proceso diferente?

Las leyes de Faraday

Primera ley

Con el circuito de la figura puede comprobarse fácilmente la primera ley de Faraday, quien fue el primero en investigar a fondo los fenómenos electrolíticos:

I) *La masa depositada en cada electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado por el electrólito.*



Si utilizamos una solución de plata, una cantidad de electricidad $q_1 = 10$ C depositará $m_1 = 11{,}2$ mg de plata; $q_2 = 20$ C depositarán el doble, $m_2 = 22{,}4$ mg; $q_3 = 5$ C, la mitad, $m_3 = 5{,}6$ mg, etc.; de modo que los cocientes son todos constantes e iguales:

$$\frac{m_1}{q_1} = \frac{11{,}2 \text{ mg}}{10 \text{ C}} = 1{,}12 \frac{\text{mg}}{\text{C}};$$

$$\frac{m_2}{q_2} = \frac{22{,}4 \text{ mg}}{20 \text{ C}} = 1{,}12 \frac{\text{mg}}{\text{C}};$$

$$\frac{m_3}{q_3} = \frac{5{,}6 \text{ mg}}{5 \text{ C}} = 1{,}12 \frac{\text{mg}}{\text{C}}$$

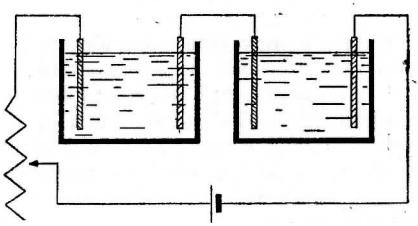
El cociente

$$\text{H} = \frac{m}{q} = 1{,}12 \frac{\text{mg}}{\text{C}}$$

se llama *equivalente electroquímico* de la plata, y expresa la cantidad de miligramos de plata que se depositan en una electrólisis por cada coulomb de carga que circula. Como lo muestra la tabla, cada sustancia tiene un determinado equivalente electroquímico, y en los problemas de galvanoplastia es importante conocer ese valor con gran precisión.

TABLA DE EQUIVALENTES ELECTROQUÍMICOS (en mg/C)

Aluminio	0,093
Plata	1,12
Oro (monovalente)	2,04
Oro (trivalente)	0,68
Cobre (monovalente)	0,66
Cobre (bivalente)	0,33
Plomo (monovalente)	2,15
Plomo (bivalente)	1,07
Sodio	0,24



Hidrógeno	0,0104
Oxígeno	0,083
Cloro	0,367

La primera ley de Faraday puede escribirse de la siguiente manera:

$$m = \mathrm{H}\, q$$
$$\text{como} \quad q = \mathrm{I} \cdot t$$

$$\boxed{m = \mathrm{H} \cdot \mathrm{I} \cdot t}$$

donde observamos que la masa de electrólito depositada es directamente proporcional a la intensidad de corriente y al tiempo que dura la electrólisis. Se puede, pues, obtener el mismo resultado si trabajamos con una corriente intensa durante un tiempo corto, o utilizando una corriente débil durante un tiempo más largo.

EJEMPLO: *¿Cuántos gramos de aluminio se depositan en una electrólisis, si la corriente ha circulado durante 10 minutos con una intensidad de 25 A?*

$$m = \mathrm{H\,I}\,t = 0{,}093\ \frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{C}} \times$$
$$\times\ 25\ \mathrm{A} \cdot 600^{\mathrm{s}} = 1\,395\ \mathrm{mg}$$
$$m \cong 1{,}4\ \mathrm{g}$$

Segunda ley

Para la comprobación de la segunda ley de Faraday puede utilizarse el circuito de la figura, donde se ven dos cubas en serie, que contienen dos soluciones electrolíticas distintas: en la primera hay nitrato de plata disuelto en agua, y en la segunda, sulfato cúprico, también en solución acuosa. Al pasar corriente por ambas cubas durante el mismo tiempo, se podrá comprobar la segunda ley de Faraday:

II) *Las masas depositadas por una misma cantidad de electricidad, están entre sí como los respectivos equivalentes químicos.*

Recordemos que equivalente químico de un elemento es una masa de ese elemento cuya medida en gramos es el cociente entre su masa atómica y su valencia. En símbolos:

$$\mathrm{G} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}}$$

Por ejemplo: la masa atómica del cobre es A = 63,6; en los compuestos donde actúa con valencia 2 (por ejemplo, en el sulfato cúprico), el equivalente químico del cobre es

$$\mathrm{G} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}} = \frac{63{,}6}{2}\ \mathrm{g} = 31{,}8\ \mathrm{g}$$

En los compuestos donde actúa con valencia 1 (por ejemplo, en el sulfato cuproso), el equivalente químico del cobre es

$$\mathrm{G} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}} = \frac{63{,}6}{1}\ \mathrm{g} = 63{,}6\ \mathrm{g}$$

En cambio, el equivalente químico de la plata es una masa de 107,9 g, pues su masa atómica es 107,9 y su valencia 1.

De acuerdo con esto, la segunda ley de Faraday se simboliza así:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{G_1}{G_2}$$

EJEMPLO: *Se efectúa una electrólisis en una cuba, con nitrato de plata (NO_3Ag) en serie con otra que contiene sulfato cúprico (SO_4Cu). Al cabo de cierto tiempo se depositan 0,18 g de plata. ¿Cuántos gramos de cobre se han depositado?*

$$\frac{m_{Ag}}{m_{Cu}} = \frac{G_{Ag}}{G_{Cu}} \therefore\ m_{Cu} = m_{Ag}\frac{G_{Cu}}{G_{Ag}}$$

$$m_{Cu} = 0{,}18\ g\ \frac{31{,}8\ g}{107{,}8\ g} = 0{,}053\ g$$

TABLA DE EQUIVALENTES QUÍMICOS (G)

Elemento	*Peso atómico*	*Valencia*	*G (en g)*
Aluminio	27	3	9
Plata	107,8	1	107,9
Oro	197	1	197
Oro	197	3	65,6
Cobre	63,6	2	31,8
Plomo	207,2	1	207,2
Plomo	207,2	2	103,6
Plomo	207,2	4	51,8
Sodio	23,3	1	23
Hidrógeno	1,008	1	1,008
Oxígeno	16	2	8
Cloro	35,4	1	35,5

La constante de Faraday

De las dos leyes anteriores, resulta:

$$\left.\begin{aligned} m_1 &= H_1\, q \\ m_2 &= H_2\, q \end{aligned}\right\} \left.\begin{aligned} \frac{m_1}{m_2} &= \frac{H_1}{H_2} \\ \frac{m_1}{m_2} &= \frac{G_1}{G_2} \end{aligned}\right\} \therefore\ \frac{G_1}{G_2} = \frac{H_1}{H_2}$$

o sea:

$$\frac{G_1}{H_1} = \frac{G_2}{H_2}$$

es decir que el cociente entre el equivalente químico de un elemento y su correspondiente equivalente electroquímico, es constante, cualquiera sea el elemento químico que se considere.

Por ejemplo:

Para el oro monovalente:

$$\left.\begin{aligned} G_{Au} &= 197\ g \\ H_{Au} &= 2{,}04\ \frac{mg}{C} \end{aligned}\right\} \therefore\ \frac{G}{H} =$$

$$= \frac{197\,000\ mg}{2{,}04\ mg/C} \cong 96\,500\ C$$

Para el cobre monovalente:

$$\left.\begin{array}{l} G_{Cu} = 63{,}6 \text{ g} \\ H_{Cu} = 0{,}66 \dfrac{\text{mg}}{\text{C}} \end{array}\right\} \therefore \frac{G}{H} =$$

$$= \frac{63\,600 \text{ mg}}{0{,}66 \text{ mg/C}} \cong 96\,500 \text{ C}$$

Para el hidrógeno:

$$\left.\begin{array}{l} G_H = 1{,}008 \text{ g} \\ H_H = 0{,}0104 \dfrac{\text{mg}}{\text{C}} \end{array}\right\} \therefore \frac{G}{H} =$$

$$= \frac{1\,008 \text{ mg}}{0{,}0104 \text{ mg/C}} \cong 96\,500 \text{ C}$$

Esta constante universal se llama *constante de Faraday,* se designa con la letra F, y su valor es:

$$F = \frac{G}{H} = 96\,500 \text{ C}$$

SIGNIFICADO FÍSICO DE F. ¿Qué cantidad de electricidad, en C, se necesita para depositar una masa igual a un equivalente químico de un elemento cualquiera?

De acuerdo con la primera ley:

$$m = H \cdot q \therefore q = \frac{m}{H}$$

Como queremos que la masa depositada valga G:

$$\left.\begin{array}{l} q = \dfrac{G}{H} \\ \text{pero hemos visto que} \\ \dfrac{G}{H} = F \end{array}\right\} \therefore q = F$$

Es decir que la constante de Faraday, F = 96 500 C, es la cantidad de electricidad necesaria para depositar una masa igual al equivalente químico de un elemento dado.

Por ejemplo: para depositar 1,008 g de hidrógeno o 107,8 de plata o 35,6 g de cloro, son necesarios 96 500 C.

EJEMPLO: *¿Cuántos coulombs son necesarios para depositar 5,04 g de hidrógeno?*

Para depositar 1,008 g son necesarios 96 500 C; luego, para depositar 5,04 g serán necesarios

$$q = \frac{96\,500 \text{ C} \cdot 5{,}04 \text{ g}}{1{,}008 \text{ g}} 482\,500 \text{ C}$$

En general:

$$q = \frac{m\,F}{G}$$

Los electrólitos y la ley de Ohm

Con un sencillo circuito –un acumulador, un reóstato para hacer variar la intensidad de corriente, una célula electrolítica, un amperímetro y un voltímetro con el que se mide la caída de tensión que se produce en la cuba– se puede comprobar que la intensidad de corriente que circula por la cuba es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre los bornes. Pero esta relación no es otra cosa que la ley de Ohm, por lo que concluimos que en la conducción electrolítica se cumple la misma ley que en la conducción en los metales.

El cociente constante entre la caída de tensión que se produce en la cuba y la intensidad de corriente que la recorre es la resistencia eléctrica de la cuba. Si la distancia entre los electrodos disminuye, la resistencia también disminuye,

porque en los electrólitos como en los metales, la resistencia es directamente proporcional a la longitud.

La resistencia específica de un electrólito varía con la temperatura, pero esa variación no se produce como en los metales, en los que la resistencia específica disminuye con la temperatura, sino como en los semiconductores, es decir, a mayor temperatura mayor resistencia específica y, por lo tanto, menos conductividad eléctrica.

Svante Arrhenius.

Los iones y la electrólisis

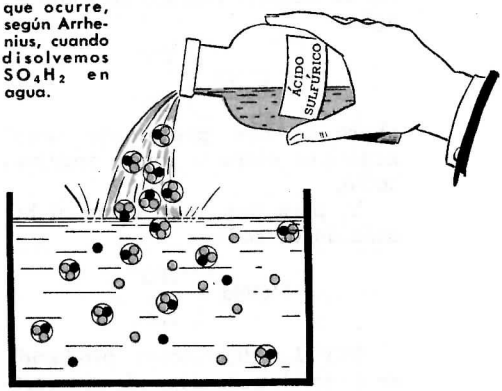
Para explicar los fenómenos que ocurren en la electrólisis, Svante Arrhenius, físico y químico danés a quien se acordó el premio Nóbel de Física en 1903, desarrolló la siguiente teoría:

I) *Al disolver un ácido en agua (o una base, o una sal), parte de las moléculas de éste se disocian en partes llamadas* iones, *que son átomos, o grupos de átomos, que tienen una cierta carga eléctrica.*

II) *En esa disociación, los metales y el hidrógeno dan* iones positivos *mientras que los demás elementos dan* iones negativos.

Arrhenius le asigna a cada ion una determinada carga por cada valencia. Así, a los iones monovalentes les corresponde una carga eléctrica, siempre la misma, cualquiera sea el elemento con tal que actúe como monovalente; a los bivalentes les corresponde doble carga que a los monovalentes; a los trivalentes, triple; etc. Después veremos cuánto vale la carga eléctrica mínima, correspondiente a los iones monovalentes.

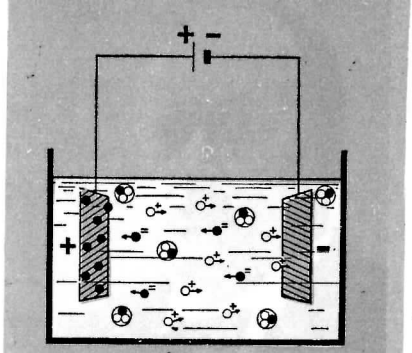
Esto es lo que ocurre, según Arrhenius, cuando disolvemos SO_4H_2 en agua.



MOLÉCULA DE ACIDO SULFÚRICO
$\bullet^{=}$ ION SULFATO
$\circ^{+}$ ION HIDRÓGENO

De acuerdo con esto, si diluimos ácido sulfúrico con agua, parte de las moléculas de ácido sulfúrico se disocian de la siguiente manera:

$$SO_4H_2 \begin{cases} H^+;\ H^+ \\ SO_4^{--} \end{cases}$$



Marcha de los iones.

es decir, se producen iones sulfato (negativos y con doble carga, por ser bivalentes) y iones hidrógeno (positivos y con una carga, pues el hidrógeno es monovalente).

Otro ejemplo: veamos qué ocurre al disolver cloruro de sodio en agua:

$$ClNa \begin{cases} Cl^- \\ Na^+ \end{cases}$$

ahora se han producido iones negativos cloro y iones positivos sodio.

Y, para una base, como el hidróxido de sodio:

$$HONa \begin{cases} HO^- \\ Na^+ \end{cases}$$

III) *La disociación producida no es total, pues depende especialmente de la concentración y de la temperatura.*

Por lo tanto, al disolver ácido sulfúrico en agua, en la cuba tenemos moléculas de agua, moléculas de ácido sulfúrico sin disociar, iones sulfato negativos y iones hidrógenos positivos*.

IV) *Al conectar los electrodos de la cuba al generador, los iones se desplazan en el interior del líquido, puesto que el electrodo positivo (ánodo) atrae a los iones negativos –que por eso se llaman* aniones*–, mientras que el electrodo negativo (cátodo) atrae a los* cationes *o iones positivos. Esta corriente iónica es la que produce la transmisión de corriente por el interior de las soluciones electrolíticas; el proceso de conducción es diferente del de los metales, donde se realiza por medio de los electrones libres.*

Por ejemplo, en el caso del ácido sulfúrico ocurre que los iones hidrógeno van hacia el cátodo, mientras que los iones sulfato van hacia el ánodo, en la forma que indica la figura.

No debe creerse que la corriente iónica es muy veloz; por lo contrario, para las tensiones comunes de trabajo la velocidad de los iones es pequeñísima (alrededor de 0,001 cm/s), pero debe tenerse en cuenta que son billones los iones que se desplazan.

Conviene observar que, de acuerdo con esto, la corriente eléctrica no causa la disociación iónica. Arrhenius hizo notar que si fuera la corriente la causa de la disociación, entonces sólo habría electrólisis a partir de una cierta corriente mínima. Sin embargo, aun corrientes debilísimas producen los fenómenos electrolíticos.

---

* Esta hipótesis no es aceptada por teorías más modernas y completas que la de Arrhenius (como la teoría de Debye); según la cual la disociación es completa. Esas teorías están fuera del nivel de este curso; de todas maneras, la teoría de Arrhenius es suficiente para explicar los fenómenos que aquí exponemos.

V) *Cuando los iones llegan al electrodo correspondiente, neutralizan su carga eléctrica y vuelven a ser los átomos o moléculas que eran antes de la disociación.*

Así, por ejemplo, en el caso del ácido sulfúrico, cuando un ion hidrógeno llega al cátodo, gana la carga eléctrica negativa que le hace falta para volver al estado neutro; análogamente, el ion sulfato que llega al ánodo entrega a éste las dos cargas que tiene de sobra, neutralizándose. Pero hay algo más: al volver al estado neutro recobran sus propiedades químicas, que habían perdido al ionizarse.

NACE EL ELECTRÓN. La constante F de Faraday tiene gran importancia teórica porque fue la primera evidencia de la estructura corpuscular de la electricidad. Cuando Faraday descubrió sus leyes de las electrólisis, la corriente eléctrica se imaginaba como un fluido continuo, que recorría los conductores como una corriente de agua que recorre una cañería. Pero el hecho de que para depositar un átomo-gramo de cualquier elemento se necesite la misma cantidad de electricidad (96 500 C) unido a que, como había probado Avogadro, en un átomo-gramo de cualquier elemento haya el mismo número de átomos, llevó a Helmholtz a la idea de que cada átomo debía conducir una cantidad *determinada* de electricidad, algo así como un granito de electricidad, y que la suma de todos esos granitos integraba la corriente eléctrica. Por otra parte ese corpúsculo eléctrico debía ser igual a la carga mínima de los iones monovalentes, pues la masa de un equivalente químico de un elemento monovalente es igual a la masa de un átomo-gramo de ese elemento.

¿Cuánto vale esa carga mínima? Designándola por *e*, es

$$e = \frac{F}{N}$$

como

$$F = 96\,500 \text{ C}$$

y

$$N = 6{,}023 \cdot 10^{23} \text{ átomos}$$

$$e = \frac{96\,500 \text{ C}}{6{,}023 \cdot 10^{23}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Por lo tanto, cada ion monovalente lleva una carga de $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; los iones bivalentes llevan una carga doble, es decir: $2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; los iones trivalentes, triple, etc.

Pero hay algo más todavía: esta carga mínima es justamente igual a la carga eléctrica del *electrón* (ver página siguiente), por lo que resulta que los iones monovalentes negativos son aquellos que tienen un electrón más, mientras que los iones monovalentes positivos son aquellos que pierden un electrón; un ion bivalente negativo tiene dos electrones más, etc. Fue Stoney, físico inglés, quien en 1876 designó con *electrón* la carga eléctrica mínima de los iones monovalentes. Así apareció por vez primera en la física un término y un concepto que con el tiempo alcanzarían gran importancia y difusión.

Interpretación de algunos procesos electrolíticos

EJEMPLOS: *Electrólisis del agua:*
Electrólito: ácido sulfúrico (SO_4H_2).
Electrodos: platino (Pt).

Disociación:

$$2\,SO_4H_2 \begin{cases} 4\,H^+ \text{ (el hidrógeno es monovalente)} \\ 2\,(SO_4)^{--} \text{ (el radical sulfato es bivalente)} \end{cases}$$

Pasaje de la corriente:

Los $4\,H^+$ van al cátodo.
Los $2\,(SO_4)^{--}$ van al ánodo.

Reacciones en los electrodos:

Cátodo: $4\,H^+ + 4$ electrones del cátodo $\longrightarrow 2\,H_2$ (molécula de hidrógeno que se libera)

Ánodo: $2\,(SO_4)^{--} - 4$ electrones entregados al ánodo $\longrightarrow 2\,SO_4$ (radical sulfato)

$$2\,SO_4 + 2\,H_2O \text{ (de la solución)} \longrightarrow 2\,SO_4H_2 + O_2$$

Resultado: en el cátodo se desprende hidrógeno; en el ánodo, oxígeno. El agua de la solución se va consumiendo, y la cantidad de ácido sulfúrico se mantiene prácticamente constante.

Cobreado de un objeto:

Electrólito: sulfato de cobre (SO_4Cu).
Electrodos: ánodo: barrita de cobre; cátodo: objeto por cobrear.

Disociación:

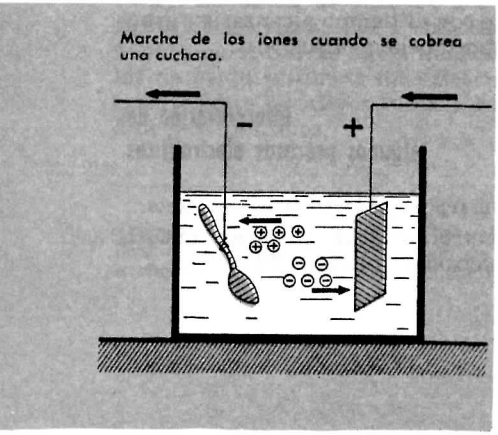
$$SO_4Cu \begin{cases} Cu^{++} \\ (SO_4)^{--} \end{cases}$$

Pasaje de la corriente:

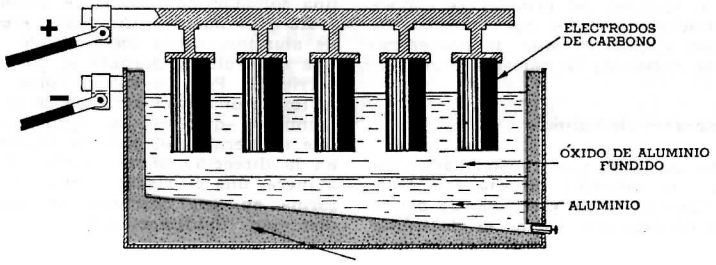
$Cu^{++} \longrightarrow$ al cátodo
$(SO_4)^{--} \longrightarrow$ al ánodo

Reacciones en los electrodos:

$Cu^{++} + 2$ electrones $\longrightarrow$ Cu que se deposita
$(SO_4)^{--} - 2$ electrones $\longrightarrow SO_4$;
$SO_4 + Cu$ (del ánodo) $\longrightarrow SO_4Cu$



Resultado: el cátodo gana tanto cobre como pierde el ánodo, pero el cobre perdido por el ánodo no pasa directamente al cátodo, sino que se transforma previamente en sulfato de cobre, que vuelve a disociarse, y el proceso continúa.



Cuba para fabricación electrolítica de aluminio; el electrólito en una mezcla de criolita y bauxita (óxido de aluminio). La corriente cumple la doble función de mantener la criolita fundida y la de descomponer la bauxita en aluminio y oxígeno. El aluminio va al cátodo en estado de fusión; el oxígeno liberado en el ánodo se combina con éste, que es de carbono, por lo que se consume gradualmente.

Otras aplicaciones de la electrólisis

Producción de aluminio

La utilización industrial más importante de la electrólisis es la obtención de aluminio, mediante el óxido de aluminio (AlO_3) (bauxita) que se descompone en oxígeno y aluminio. El proceso se efectúa en cubas que miden, aproximadamente, 2 m por 5 m por 1 m, en las que se producen unos 250 kg de aluminio por día, empleándose como electrólito una solución de óxido de aluminio fundido en *criolita* (fluoruro doble de aluminio y sodio). La gran intensidad de la corriente necesaria para el proceso (entre 30 000 y 40 000 A), hace que éste sólo resulte barato cuando se cuenta con fuentes hidroeléctricas para proveer la energía necesaria. En este proceso, como en todas las aplicaciones de la electrólisis, se necesita imprescindiblemente corriente continua.

Impresión de discos fonográficos

Se hace una primera grabación sobre cera dura, a la que se cubre luego con una capa de grafito, que la hace conductora de la electricidad. Luego se deposita, por electrólisis, una capa de cobre y otra de níquel. Se funde la cera y se monta la película metálica, fiel reproducción de la grabación en cera, sobre una matriz de acero, para el estampado directo de los discos fonográficos.

Purificación de metales

Por electrólisis se efectúa la refinación de muchos metales, en especial cobre y cinc. En el caso del cobre, por los procesos comunes de metalurgia al fuego, se obtiene con una pureza máxima de 98,5 %. Para conseguir una pureza del 99,99 % se instalan baños electrolíticos en los que actúan como ánodo la barra de cobre a purificar y como cátodo una delgadísima lámina de cobre puro. Cuando circula la corriente, se deposita en el cátodo cobre en alto estado de pureza. Las impurezas del ánodo van al fondo de la cuba o a la solución.

Análisis químico

La electrólisis es muy empleada como método para análisis químico, especialmente de metales. Si, por ejemplo, se desea conocer la pureza de un tipo de cobre, se disuelve una cierta cantidad de ese cobre en ácido sulfúrico o nítrico. Se realiza luego una electrólisis, usando electrodos de platino. Todo el cobre de la solución, al cabo de un cierto tiempo, va al cátodo. Pesando

éste, al término del proceso, se conoce la cantidad de cobre que había en la solución y, por lo tanto, la concentración en cobre de la muestra analizada.

Rectificadores electrolíticos

Son aparatos que transforman (rectifican) la corriente alterna en continua. Constan de un electrodo de plomo y otro de aluminio, siendo el electrólito una solución de fosfato de amonio, de sodio o de potasio. Cuando el electrodo de aluminio actúa como cátodo, la célula electrolítica permite el paso de la corriente. Pero al actuar como ánodo, se forma una capa invisible de óxido de aluminio –que es un semiconductor– que no permite el paso de la corriente en la dirección ánodo-cátodo. De esta manera, una corriente alterna se transforma en una corriente de una sola dirección (unidireccional).

Problemas

1. ¿Qué intensidad de corriente se necesita para depositar una masa de 1,5 g de plata en una hora?

R.: 0,37 A

2. Calcular el equivalente electroquímico del cobre bivalente en mgr/A h, siendo su peso atómico 63,65 y la constante de Faraday 96 500 C.

R.: 1 186,3 mgr/A h

3. ¿Qué volumen de oxígeno a 20° C y 700 mm Hg de presión se obtienen en una electrólisis de agua con una corriente de 0,5 A durante 1 hora (densidad del oxígeno a 0° C y 760 mm Hg = 0,001 427).

R.: 121,82 cm^3

4. A una célula electrolítica con solución de sulfato cúprico se aplica una tensión de 5 V. Calcular el costo de la energía consumida por cada kg de cobre obtenido, sabiendo que el kWh vale 0,30 $.

R.: 1,26 $

5. Se trata de platear un objeto de 200 cm^2 de superficie mediante una corriente de 5 A. ¿Qué tiempo transcurrirá para que el depósito adquiera un espesor de 0,1 mm? (Se emplea nitrato de plata; densidad de la plata 10,5 g/cm^3.)

R.: $1^h\ 2^m\ 30^s$

6. Dos cubas en serie contienen: una, solución de nitrato de plata, y la otra, de sulfato cúprico. En la primera se han depositado 2,5 g de plata. ¿Cuánto cobre se ha depositado en la segunda? ¿Cuántos coulombs han circulado por el circuito?

R.: 0,73 g; 2 232 C

7. Una corriente eléctrica deposita 10 g de plata en 5 horas. Esa misma corriente atraviesa una lámpara de 60 W. Calcular la resistencia de la lámpara y la diferencia de potencial entre sus bornes.

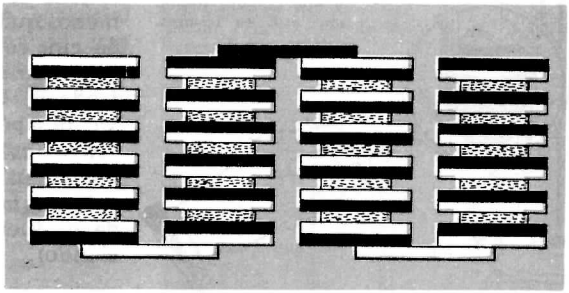
R.: 120 V; 240 Ω

20 PILAS, ACUMULADORES, TERMOELECTRICIDAD

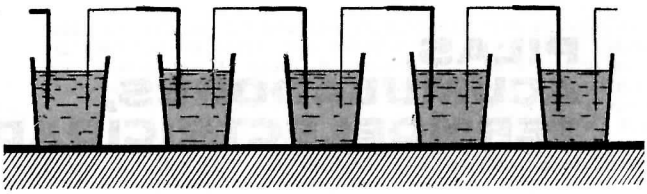
Pilas

Galvani y Volta

Ya hemos dicho que la primera pila fue inventada por Alejandro Volta en 1800, y que con ello puede decirse que nació la electricidad moderna. La invención de Volta es uno de los episodios más interesantes de la historia de la electricidad. Galvani, profesor de Anatomía de la Universidad de Bolonia, realizó una experiencia con una rana: con una barrita de cobre tocó la médula de la rana, mientras con otra de cinc tocaba los músculos de una pata, que, entonces se contraía convulsivamente. ¿Cómo explicar esto? Galvani supuso que la causa era una corriente eléctrica *producida por la rana*, análoga a los impulsos nerviosos que producen los movimientos en el animal vivo. Pero Volta no halló aceptable esta explicación y mostró que la rana no producía la corriente, sino que ella únicamente mostraba la existencia del fenómeno, actuando como una especie de galvanómetro animal. Para probar su hipótesis, Volta construyó su pila, que era en verdad una *pila* de monedas de cobre y plata; entre una moneda y otra intercalaba un trozo de paño embebido en agua acidulada, de modo que la pila estaba construida así: moneda de cobre-paño-moneda de plata-moneda de cobre-paño-moneda de plata, etc. Se trata en realidad de una batería de pilas



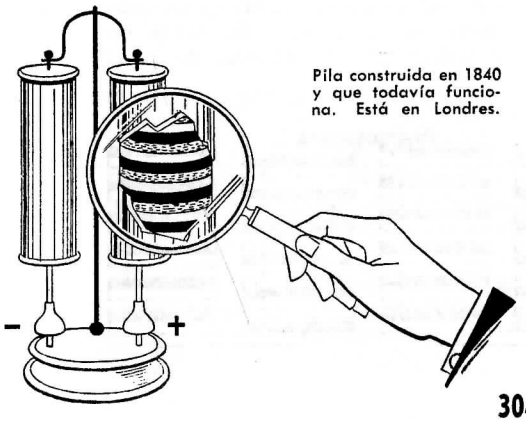
Primera pila que construyó Volta.



Otra pila construida por Volta. Cada vaso contiene agua salada y los electrodos son tiras de Ag y Zn, sumergidas en los vasos y conectadas de tal manera que cada tira de Ag está unida a la tira de Zn del vaso siguiente.

en serie, porque cada conjunto moneda-paño-moneda, es una pila. El efecto se hace notable, porque al ponerlas en serie la fuerza electromotriz total es la suma de las fuerzas electromotrices producidas por cada conjunto.

En la pág. 228 hemos indicado cómo fabricar la pila de Volta en forma casera: bastan un vaso que contenga una solución diluida de ácido sulfúrico y, como electrodos, una barrita de cinc y otra de cobre. Al conectar los electrodos, circula la corriente, que, por el exterior, va del cobre al cinc y a través de la pila, del cinc al cobre. Simultáneamente se verifican en las pilas fenómenos químicos: en el electrodo de cobre se desprenden burbujas de hidrógeno, mientras que el electrodo de cinc es atacado por el electrólito, y se disuelve.



Pila construida en 1840 y que todavía funciona. Está en Londres.

Al cabo de un tiempo relativamente breve, la pila deja de suministrar corriente. Si se la intenta recargar –por ejemplo, conectándola a los electrodos de otra pila "fresca"– se observa que ello no es posible. Por eso se dice que la pila de Volta es *irreversible*.

La pila de Daniell

Consiste esencialmente, en un vaso que contiene en su interior otro vaso poroso. El vaso grande está lleno de una solución de sulfato de cinc, en la que está sumergida una barrita de cinc; el vaso poroso contiene una solución de sulfato de cobre, donde está sumergida una barrita de cobre. Cuando se conectan ambas barras mediante un conductor, circula una corriente eléctrica del cobre al cinc.

Como en la pila de Volta, también aquí la producción de corriente está acompañada de fenómenos químicos: mientras la barra de cinc se va disolviendo, aumenta la cantidad de Cu en el electrodo de Cu, y en el vaso poroso va desapareciendo el sulfato de cobre (esto es fácil de comprobar porque la solución de sulfato de cobre que primitivamente era de un fuerte color azul va palideciendo).

Pero la pila de Daniell, es *reversible*: cuando se agota se la puede volver a *cargar* conectándola a otra pila o a un acumulador.

Los dos problemas fundamentales

El funcionamiento de las pilas plantea dos problemas:

a) ¿Cómo produce corriente eléctrica la pila?

b) ¿Cuál es el origen de la energía eléctrica producida por la pila?

Hemipilas

Para comprender el mecanismo de producción de la corriente que suministra una pila hay que aceptar el siguiente hecho básico:

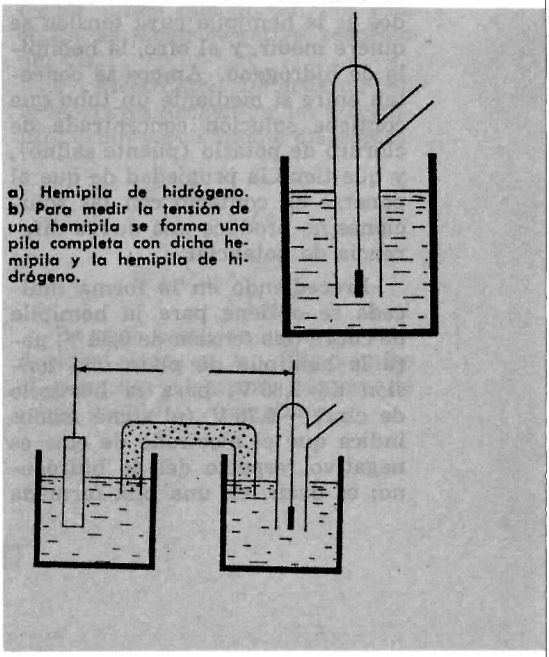
Cuando se sumerge un electrodo en una solución que contiene iones del metal de que está hecho el electrodo, entre el electrodo y la solución se produce una diferencia de potencial. Por ejemplo: si se sumerge una barrita de cinc en una solución de sulfato de cinc, se produce una diferencia de potencial entre el cinc y el sulfato de cinc; otra diferencia de potencial distinta que la anterior se crea entre una barrita de cobre y una solución de sulfato de cobre en la cual se la sumerge; etc.

El electrodo y la solución forman una media pila o *hemipila* y la diferencia de potencial que se crea se llama *tensión* o *potencial* de la hemipila.

¿Cómo medir la tensión de una hemipila? Naturalmente, no puede realizarse ningún contacto metálico con la solución, pues entonces, al introducir otro electrodo, la hemipila se transforma en una pila completa y lo que se mide es la diferencia de potencial de dicha pila. La solución consiste en elegir alguna hemipila como elemento de referencia (hemipila normal) y medir las tensiones de todas las hemipilas *con respecto a esa hemipila normal.*

La hemipila de hidrógeno

Ésta es la hemipila normal, que se construye de la siguiente manera: se sumerge parcialmente un alambrecito de platino recubierto con polvo muy fino de platino, en un vaso que contenga un electrólito que se disocia dando iones hidrógeno, por ejemplo, ácido clorhídrico. En la solución se hace bur-



a) Hemipila de hidrógeno. b) Para medir la tensión de una hemipila se forma una pila completa con dicha hemipila y la hemipila de hidrógeno.

bujear hidrógeno gaseoso que es absorbido por el polvo de platino, de modo que el electrodo se va transformando paulatinamente en una *barra de hidrógeno*. Al final se obtiene una hemipila formada por un electrodo de hidrógeno sumergido en una solución que contiene iones hidrógeno. El potencial de la hemipila depende de la concentración de la solución, de modo que para la hemipila normal se elige una solución de concentración normal, es decir, una que contenga 1 mol de iones hidrógeno por cada litro de solución.

La serie electromotriz

Una vez construida la hemipila de hidrógeno se mide la tensión de una hemipila cualquiera con respecto a la pila normal, a la que asignaremos, por convención, potencial *cero*. Es decir: se construye una pila, uno de cuyos electrodos es la hemipila cuya tensión se quiere medir, y el otro, la hemipila de hidrógeno. Ambos se conectan entre sí mediante un tubo que contiene solución concentrada de cloruro de potasio (puente salino), y que tiene la propiedad de que al ponerse en contacto con las soluciones no produce una nueva diferencia de potencial.

Procediendo en la forma indicada se obtiene para la hemipila de cobre una tensión de 0,34 V; para la hemipila de plata una tensión de 0,86 V; para la hemipila de cinc, — 0,76 V (el signo menos indica que el electrodo de cinc es negativo respecto del de hidrógeno; es decir, en una pila formada por un electrodo de cinc y otro de hidrógeno, éste es el borne positivo, y el de cinc el negativo).

Estas tensiones se denominan también *tensión de los metales*, y de acuerdo con su valor se suele ordenar a los metales en la llamada *serie electromotriz*. He aquí algunos integrantes de la serie, con su correspondiente tensión:

Litio	— 2,96	volts
Sodio	— 2,71	„
Magnesio	— 2,34	„
Aluminio	— 1,70	„
Cinc	— 0,76	„
Estaño	— 0,13	„
Hidrógeno	0,00	„
Cobre	+ 0,34	„
Mercurio	+ 0,79	„
Plata	+ 0,86	„
Oro	+ 1,42	„

La utilidad de la serie electromotriz es muy grande. Por ejemplo, si se forma una pila por la unión de una hemipila de cobre y una hemipila de cinc, la fuerza electromotriz de la pila completa –que no es otra que la pila de Daniell– es igual a la diferencia entre las potenciales de ambas hemipilas, es decir, 0,34 V — (— 0,76 V) = 1,10 V. Si se mide la f. e. m. de una pila de Daniell por el método de oposición obtendremos justamente 1,10 V como valor de esa fuerza electromotriz. Otro ejemplo: la fuerza electromotriz de una pila formada por la reunión de una hemipila de cinc y otra de plata valdrá 0,86 — (— 0,76) = 1,62 V.

El valor del potencial de un metal indica también la capacidad relativa de producir iones al ser sumergido en una solución que

contiene sus iones. En efecto: por ejemplo, si al sumergir una barra de cinc, en una solución de sulfato de cinc aparece una diferencia de potencial, significa que la barra de cinc, que antes de ser sumergida era eléctricamente neutra, se ha electrizado. Como lo indica la serie electromotriz, se ha electrizado negativamente respecto del electrodo de hidrógeno, lo que significa que ha perdido iones positivos. Cuanto más electronegativo es el metal respecto del hidrógeno, mayor es la cantidad de iones que pierde. Por lo tanto el cinc tiene mayor tendencia a formar iones positivos que el estaño y menor que el magnesio.

Explicación del funcionamiento de la pila de Daniell

Analizaremos el problema en dos etapas: I) ¿Qué ocurre antes de conectar los electrodos entre sí? II) ¿Qué ocurre cuando se conectan los electrodos, y la pila comienza a funcionar?

Primera etapa

1) *Electrodo de cinc:* Al sumergirlo en la solución de sulfato de cinc se desprenden iones Zn^{++} que van a la solución. Como el Zn es bivalente, cada ion lleva una carga eléctrica positiva igual a *2 e* (siendo *e* la carga eléctrica del electrón) pero positiva (teoría de Arrhenius)*. Pero como el electrodo de Zn es eléctricamente neutro antes de ser sumergido, las cargas eléctricas positivas que posee están equilibradas por un número igual de cargas eléctricas negativas, y por cada ion que pierde, queda con un exceso de carga negativa igual a *2 e*. Por lo tanto, a medida que se producen iones positivos, el electrodo se hace cada vez más electronegativo.

Pero la barra no se disuelve por completo: cuando ha producido una cierta cantidad de iones Zn, éstos rodean al electrodo formando una nube de cargas positivas que rechazan a toda nueva carga positiva que quiera entrar en la solución. Se llega así, a un verdadero equilibrio eléctrico.

2) *Electrodo de cobre.* El proceso es análogo: se producen iones cobre positivos y el electrodo queda cargado negativamente. Pero, de acuerdo con la posición relativa del Cu y el Zn en la serie electromotriz, el Zn pierde más iones positivos, o sea, queda con más electrones libres que el Cu; por eso, el Zn es electronegativo respecto del Cu.

3) *Electrólitos.* De acuerdo con la teoría de Arrhenius, los electrólitos están parcialmente disociados:

$$SO_4Zn \begin{cases} SO_4^{--} \\ Zn^{++} \end{cases}$$

$$SO_4Cu \begin{cases} SO_4^{--} \\ Cu^{++} \end{cases}$$

En cada caso, los iones así producidos están en equilibrio entre sí, pues hay el mismo número de iones positivos y negativos.

---

* Ver pág. 297.

Segunda etapa

Al conectar los electrodos, por el cable pasan electrones del Zn al Cu*, quien se hace así más electronegativo. Entonces, cada *2 e* que llegan al Cu, atraen a un ion Cu^{++} de los que están en la solución, quedando al mismo tiempo sin equilibrar un ion SO_4^{--}. Simultáneamente, al ceder el electrodo de Zn sus electrones libres en exceso, se rompe el equilibrio eléctrico y se producen más iones Zn^{++}; por cada *2 e* que pasan del Zn al Cu se disuelve un ion Zn^{++}. De tal manera la solución de SO_4Zn se hace electropositiva y atrae a los iones SO_4^{--} que quedaron sin equilibrar en la solución de SO_4Cu; estos iones atraviesan las paredes del vaso que los contiene –por esa razón el vaso debe ser poroso– de modo que por cada *2 e* que llegan al electrodo de Cu, un ion SO_4^{--} cambia de compartimiento. En el vaso grande se unen con los iones Zn^{++}, formándose SO_4Zn. Como resultado final se disuelve completamente la barra de Zn o se terminan los iones Cu; entonces la pila deja de funcionar.

Al explicar cómo una pila Daniell produce corriente eléctrica, se ha explicado también cómo se producen las reacciones químicas del funcionamiento de la pila: disolución del electrodo de Zn, aumento de la cantidad de Cu en el electrodo de Cu, aumento de la cantidad de SO_4Zn, consumición del SO_4Cu.

La cantidad de Zn que se disuelve y la cantidad de Cu que se deposita puede calcularse fácilmente recordando que, de acuerdo con la ley de Faraday, por cada 96 500 C se disuelve o deposita una cantidad de metal igual al *equivalente electroquímico* del metal. El cálculo se realiza en la forma que enseña el siguiente

EJEMPLO: *La f. e. m. de una pila de Daniell vale 1,10 V y su resistencia interna 2 Ω. Se conectan los bornes de la pila con un alambre de 8 Ω de resistencia. Calcular la cantidad de Zn consumida en 1 hora y la cantidad de Cu depositada en el electrodo de Cu en ese mismo tiempo (peso atómico Zn = 65,4; peso atómico Cu = 63,6).*

De acuerdo con la ley de Ohm, la intensidad de la corriente suministrada por la pila vale

$$1 = \frac{E}{R} = \frac{1{,}10\ V}{10\ \Omega} = 0{,}11\ A$$

La carga eléctrica que ha circulado en 1 hora es:

$$Q = i\,t = 0{,}11\ A \cdot 3\,600^{s} = 396\ C$$

Equivalente químico del $Zn = \frac{65{,}4}{2} = 32{,}7$

Por lo tanto

96 500 C disuelven 32,7 g de Zn

396 C disuelven $\frac{32{,}7 \cdot 396}{96\,500} = 0{,}13$ g

Análogamente:

Equivalente químico del $Cu = \frac{63{,}2}{2} = 31{,}6$

* De acuerdo con el sentido técnico convenido para la corriente, ese flujo de electrones del Zn al Cu equivale a una corriente del Cu al Zn.

La cantidad de Cu depositada será

$$\frac{31{,}6\ \text{g} \cdot 396\ \text{C}}{96\,500\ \text{C}} = 0{,}13\ \text{g}$$

Origen de la energía eléctrica de la pila de Daniell

En el parágrafo anterior hemos resuelto, para la pila Daniell, uno de los dos problemas fundamentales planteados en la página 305: cómo produce corriente eléctrica una pila. El segundo problema es: ¿Cuál es el origen de la energía eléctrica producida por la pila?

De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la energía eléctrica que produce una pila debe provenir de la transformación de alguna clase de energía, que en este caso es la energía química que acompaña a las reacciones que se producen en la pila.

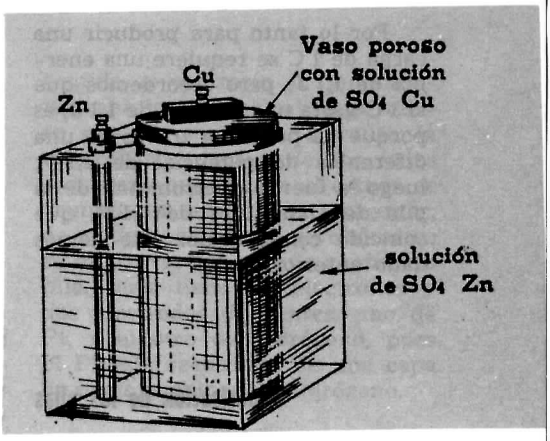
Consideremos lo que ocurre en una pila de Daniell cuando ella produce una carga eléctrica de 1 coulomb. La cantidad de Zn disuelta por 1 C es

$$\frac{32{,}7}{96\,500} = 0{,}000\,34\ \text{g}$$

y la cantidad de Cu que se ha depositado en el electrodo de Cu es

$$\frac{31{,}6}{96\,500} = 0{,}000\,32\ \text{g}$$

El Zn disuelto forma, con los iones sulfato, una cierta cantidad de sulfato de Zn. Pero esa reacción se realiza desprendiendo una cierta cantidad de calor, llamado *calor de formación* del sulfato de



La pila de Daniell.

cinc, que vale 1 630 cal por cada gramo. Por lo tanto, para los 0,000 34 g se desprenden

$$1\,630\,\frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot 0{,}000\,34\ \text{g} = 0{,}554\ \text{cal} = 2{,}31 \cdot 10^7\ \text{erg} \cong 2{,}3 \cdot 10^7\ \text{erg}$$

Análogamente, al formarse el sulfato de cobre se liberan 881 cal por cada gramo. Pero en la pila de Daniell el sulfato de cobre no se forma, sino que se disocia; y para ello necesita *absorber* 881 cal por cada gramo. Por lo tanto, para los 0,000 32 g de cobre se requieren

$$881\,\frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot 0{,}000\,32\ \text{g} = 2{,}82\ \text{cal} = 1{,}18 \cdot 10^7\ \text{erg} \cong 1{,}2 \cdot 10^7\ \text{erg}$$

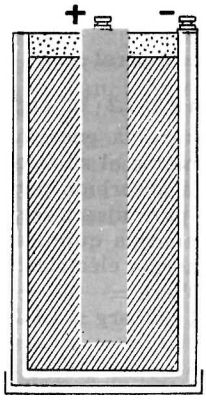
La diferencia entre la energía desprendida al formarse el sulfato de cinc y la energía absorbida por el sulfato de cobre para disociarse, da la cantidad de energía química transformada en energía eléctrica:

$$2{,}3 \cdot 10^7\ \text{erg} - 1{,}2 \cdot 10^7\ \text{erg} = 1{,}1 \cdot 10^7\ \text{erg} = 1{,}1\ \text{J}$$

Por lo tanto para producir una carga de 1 C se requiere una energía de 1,1 J; pero recordemos que si 1 C gasta una energía de 1,1 J, es porque ha pasado a través de una diferencia de potencial de 1,1 V; luego la fuerza electromotriz de la pila de Daniell es de 1,1 V, que coincide con el valor que hemos dado anteriormente.

Polarización de las pilas

En la pila de Volta el hidrógeno que se acumula en el electrodo de cobre es sumamente dañoso: el hidrógeno es un gas, y por lo tanto mal conductor de la electricidad; al acumularse burbujas de hidrógeno en una parte de la pila aumenta la resistencia interna. Por otra parte, no todos los iones hidrógenos se neutralizan al entrar en contacto con el electrodo de cobre; poco a poco el electrodo se va cubriendo con una capa de iones de hidrógeno y al cabo de un tiempo la pila se ha transformado en otra cuyos electrodos son cinc e hidrógeno; de acuerdo con la serie electromotriz, la f. e. m. de esta pila es de 0,76 V, bastante inferior a la f. e. m. de la pila de Volta. Este fenómeno se llama *polarización de la pila*; para combatirlo debe eliminarse el hidrógeno, lo que generalmente se logra mediante una sustancia rica en oxígeno, porque éste se combina con el hidrógeno para formar agua. Así, por ejemplo, en la pila de Leclanché (cuyos electrodos son una barra de cinc, como electrodo negativo; una barra de carbón, como positivo, y, como electrólito, agua con sal de amoníaco), la barra de carbón está rodeada por carbón pulverizado mezclado con bióxido de manganeso que actúa como despolarizante.



Corte de una pila seca común.

La pila seca

Por razones de comodidad, la pila seca ha reemplazado en casi todos los usos de la pila húmeda. El electrodo negativo es de cinc y constituye la propia envoltura de la pila. El electrodo positivo es una barra de carbón colocada en el centro de la pila, rodeado de una pasta humedecida con solución de cloruro de amonio –electrólito– y bióxido de manganeso –despolarizante–. Todo está envuelto en un papel absorbente impregnado en cloruro de amonio. Para evitar la evaporación la parte superior de la pila se sella.

Toda pila seca, cualquiera sea su tamaño, tiene la misma fuerza electromotriz: 1,5 V. La resistencia interna depende del tamaño; en las de mayor tamaño, esa resistencia es mayor.

El principio de los acumuladores, o para qué sirve la polarización

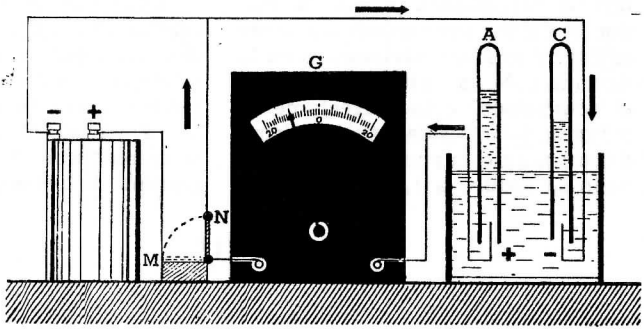
Dijimos que la polarización de una pila debe ser combatida enérgicamente. Sin embargo (no hay mal que por bien no venga), precisamente en la polarización se basan los acumuladores, cuya utilidad es bien conocida. La figura representa un voltámetro de agua, con el ánodo en A y el cátodo en C. Una pila suministra la corriente, cuya intensidad medimos con el amperímetro G.

Cerremos el circuito conectando la llave con el punto M. La corriente sale del polo positivo de la pila, pasa por el amperímetro, entra en el voltámetro por el ánodo, sale por el cátodo, y vuelve a la pila por el polo negativo.

Si dejamos que se realice la electrólisis durante cierto tiempo, y luego conectamos la llave con el punto N, observaremos algo sorprendente: a pesar de estar desconectada la pila, el amperímetro indica el pasaje de corriente, cuyo sentido es contrario al que suministraba la pila. ¿Cuál es la fuente que la produce? Durante la electrólisis, muchos de los iones hidrógeno que fueron al cátodo se acumularon en él, sin descargar, de modo que al final el voltámetro se ha convertido en una verdadera pila, pues tiene un electrólito y dos electrodos *diferentes*, uno de Pt, y el otro de hidrógeno, pues el Pt está recubierto de una capa de *iones positivos* de hidrógeno.

Acumulador de plomo

El acumulador de plomo, en esencia, consiste en dos placas de plomo sumergidas en ácido sulfúrico diluido (se usa una solución de ocho partes de agua y una de ácido, cuidando echar el ácido en el agua, y no lo inverso). Al sumergir los dos electrodos en el ácido, ambos se cubren de una ligera capa de sulfato de plomo. Pero todavía no es una pila, porque si bien posee electrólito y dos electrodos, éstos no son diferentes. Los electrodos se diferencian durante la carga, es decir, cuando a través del acumulador se hace pasar una corriente. Mientras dura la carga, en el cátodo se despren-



El principio del acumulador.

den burbujas de hidrógeno, y en el ánodo, de oxígeno. Simultáneamente, la placa del ánodo se cubre de una sustancia de color pardo (peróxido de plomo), y el cátodo, de plomo. Al terminar el proceso de carga, tenemos dos electrodos diferentes: uno de plomo, y otro, de peróxido de plomo. Al unir los dos electrodos se produce una corriente eléctrica. ¿Cuándo cesa esta corriente? Cuando los electrodos vuelven a ser iguales: se dice entonces que el acumulador se ha descargado.

Las reacciones químicas que ocurren durante la carga y la descarga permiten comprender mejor la transformación de los electrodos:

Carga

Electrólito: SO_4H_2 disociado en $(SO_4)^{--}$ y $2H^+$.

Reacción en el cátodo: $2H^+ \rightarrow H_2$; $H_2 + SO_4Pb$ (del cátodo) $\rightarrow$ $\rightarrow SO_4H_2 + Pb$.

Reacción en el ánodo: $(SO_4)^{--} \rightarrow SO_4$; $SO_4 + 2H_2O + SO_4Pb$ (del ánodo) $\rightarrow 2SO_4H_2 + PbO_2$.

RESUMEN: un electrodo se recubre de plomo, y el otro de peróxido de plomo (PbO_2); la solución se enriquece en SO_4H_2.

Descarga

Reacción en el cátodo: $SO_4H_2 + Pb \rightarrow H_2 + SO_4Pb$.

Reacción en el ánodo: $2SO_4H_2 + PbO_2 \rightarrow SO_4 + SO_4Pb + 2H_2O$.

RESUMEN: los dos electrodos se recubren de sulfato de plomo y la solución se empobrece en SO_4H_2.

Síntesis de las reacciones de carga y descarga

Ánodo: $SO_4 + SO_4Pb + 2H_2O \leftrightharpoons 2SO_4H_2 + PbO_2$.

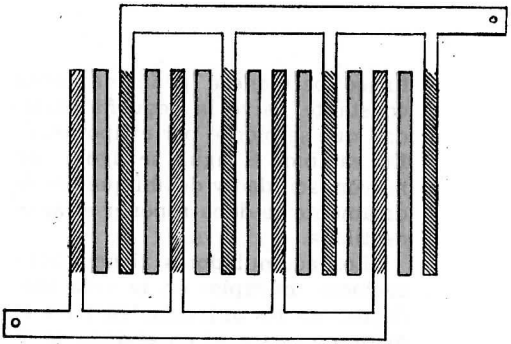
Cátodo: $H_2 + SO_4Pb \leftrightharpoons SO_4H_2 + Pb$.

Cuando el acumulador está cargado, la solución es rica en ácido sulfúrico; por eso, para saber si un acumulador está cargado, se usa un densímetro, porque la mayor o menor proporción de ácido sulfúrico produce variaciones en la densidad de la solución. Cuando el acumulador está perfectamente cargado, su densidad es 1,3 g/cm³, mientras que cuando está descargado se reduce a 1,1 g/cm³.

El acumulador no acumula electricidad

Conviene hacer notar que el acumulador no acumula electricidad, sino que se trata de un aparato que transforma energía. Durante la carga suministramos energía eléctrica al acumulador, que la transforma en energía química. Durante la descarga ocurre el pro-

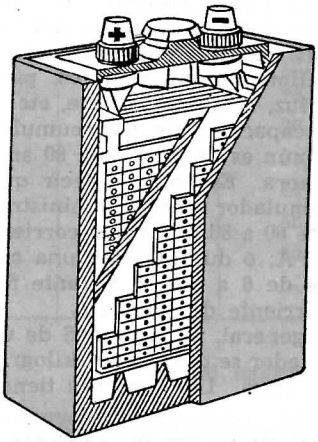
ceso contrario: la energía química acumulada en la carga se transforma en energía eléctrica. Cuando un acumulador queda descargado, no es que se le ha agotado la energía eléctrica almacenada, sino que se ha agotado la energía química, y los electrodos se han vuelto iguales.



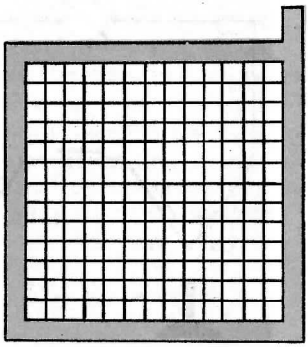
Como se disponen las placas de un acumulador.

La batería acumuladora común

El acumulador más común es el de los automóviles, llamado de Planté –nombre de su inventor–, que no es en realidad un acumulador único, sino una batería de 3 elementos acoplados en serie. Cada elemento está constituido por un par de placas, con muchas celdas, como un panal de abejas, sumergidas en ácido sulfúrico diluido, y separadas entre sí por láminas aislantes, de madera. En las placas positivas las celdas se rellenan con óxido rojo de plomo (minio) que en la carga se transforma en peróxido de plomo; en las negativas, con óxido amarillo de plomo (litargirio) que se transforma en sulfato de plomo. Cada uno de estos elementos suministra, a plena carga, una tensión de unos 2 volts.



Arriba): Corte de un acumulador de plomo. Abajo): Placa mostrando las celdillas.



La característica más sobresaliente de esta batería es su pequeña resistencia interna, por lo cual supera a cualquier pila conocida. Además, su fuerza electromotriz es prácticamente constante durante todo el tiempo de funcionamiento; sólo baja cuando falta poco para quedar completamente descargada.

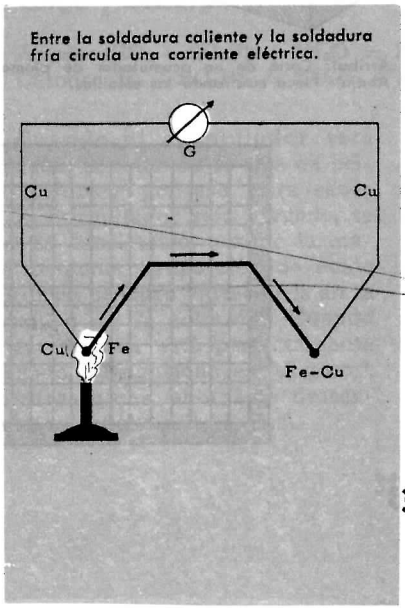
Las reacciones químicas que se producen en el acumulador prueban que la cantidad de ácido sul-

fúrico permanece prácticamente constante, salvo la pequeña cantidad que se pierde por evaporación. En cambio, el agua se agota con mayor facilidad y de ahí que periódicamente se deba reponer el agua destilada.

Los acumuladores tienen aplicaciones múltiples en la vida moderna: en los automóviles, para el arranque, para el encendido de la chispa, para iluminar los faros y para dar corriente a la radio. Además de estas aplicaciones, se emplean en los submarinos, los que, cuando están sumergidos, dependen casi exclusivamente de ellos, pues alimentan los motores, producen luz, renuevan el aire, etc.

La capacidad de un acumulador común es de unos 60 a 80 amperes-hora. Eso quiere decir que el acumulador puede suministrar durante 60 a 80 horas una corriente de 1 A; o durante 10 h una corriente de 6 a 8 A; o durante 5 h una corriente de 12 A, etc.

En general, la capacidad de un acumulador se calcula por kilogramo de placa. Los comunes tienen una capacidad de unos 10 amperes-hora por kilogramo de placa. Esto significa que si un acumulador tiene 4 kg de placa, por ejemplo, su capacidad es de 40 amperes-hora.



Entre la soldadura caliente y la soldadura fría circula una corriente eléctrica.

Termoelectricidad

La experiencia que muestra la figura permite apreciar un fenómeno muy curioso, descubierto por el físico alemán Seebeck en 1882, y que por eso se llama comúnmente *efecto Seebeck*: al calentar la soldadura Fe-Cu con un mechero, el galvanómetro indica el paso de una corriente, pese a que no hay ningún generador visible en el circuito.

Si la experiencia se realiza nuevamente, pero de modo que dos mecheros calienten ahora simultáneamente las dos uniones metálicas, se observará que entonces no circula corriente. Consecuencia: si se disponen dos metales diferentes, en la forma que muestra la figura, y de modo que una de las soldaduras esté caliente y la otra fría, se observará que entre ambas circula una corriente dirigida de soldadura caliente a la soldadura fría. La presencia de la corriente denuncia la existencia de una fuerza electromotriz, que por su origen se llama *fuerza electromotriz termoeléctrica*. Estas fuerzas electromotrices son general-

mente muy pequeñas; en nuestro ejemplo, de Fe-Cu, 1° C de diferencia de temperatura entre ambas uniones produce una f. e. m. de $16 \cdot 10^{-5}$ V.

En el cuadro siguiente se resumen algunos valores de las fuerzas electromotrices de los pares termoeléctricos más comunes:

F. E. M. DE ALGUNAS TERMOCUPLAS EN MILIVOLTS
(Temperatura de la soldadura fría: 0° C)

Temperatura de la soldadura caliente	*Platino - Platino Rodio*	*Hierro Constantán (*)*	*Cobre Constantán*	*Chromel - Alumel (*)*
100° C	0,64	5,6	4,3	4,1
200	1,44	11,2	9,35	8,1
300	2,52	16,9	14,9	12,2
400	3,25	22,5	21,9	16,4
500	4,22	28,3	27,45	20,6
800	7,33	47,3	—	33,3
1 000	9,57	—	—	41,3
1 200	11,92	—	—	48,8
1 400	14,31	—	—	55,8
1 600	16,67	—	—	—

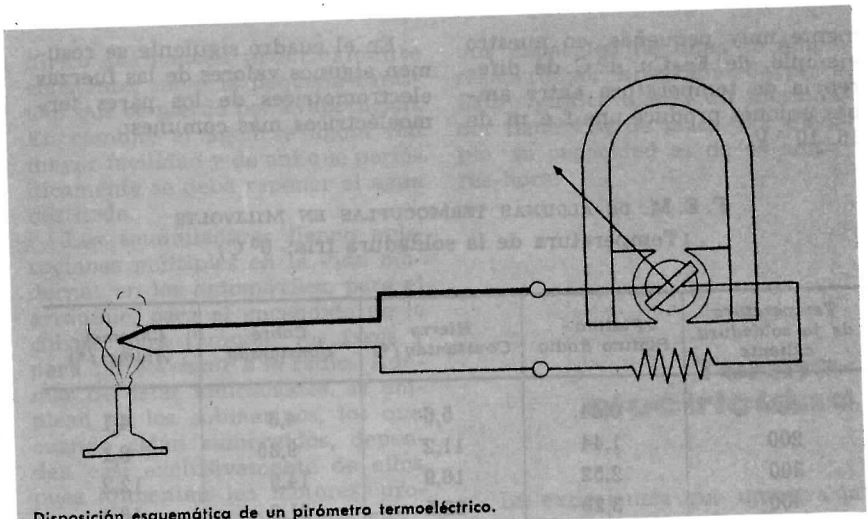
El cuadro enseña cómo aumenta la f. e. m. de las diversas termocuplas a medida que aumenta la diferencia de temperatura entre las soldaduras; para una misma diferencia de temperatura la termocupla de platino-platino rodio (un alambre es de platino y el otro de una aleación de platino y rodio) genera una f. e. m. menor que las otras, pero en cambio presenta la ventaja de que se puede trabajar con ella –gracias al elevado punto de fusión del platino– a temperaturas mucho mayores.

Pirómetros termoeléctricos

La aplicación más difundida de las termocuplas es la medición de temperaturas, puesto que el voltaje producido depende de la diferencia de temperatura entre ambas soldaduras. Por lo tanto, un pirómetro termoeléctrico consiste sencillamente en una termocupla y un milivoltímetro cuya escala se gradúa en °C, calibrán-

* Constantán: aleación de cobre y níquel.

* Chromel-alumel: aleación de cromo y níquel.



Disposición esquemática de un pirómetro termoeléctrico.

dolo por comparación con otro pirómetro. Si debe medirse la temperatura de un horno, por ejemplo, se introduce en él una de las soldaduras, qué será en consecuencia la soldadura caliente, mientras que la otra soldadura se deja en el aire, a buena distancia del horno, o mejor aún, se la entierra a unos 3 m de profundidad, donde la experiencia ha comprobado que la temperatura se mantiene notablemente constante.

Los pares termoeléctricos más empleados para la construcción de pirómetros termoeléctricos son los que figuran en el cuadro anterior; cuando se trabaja hasta 800° C se prefiere emplear hierro-constantán que tiene la ventaja de que una pequeña variación de temperatura produce una sensible variación de voltaje; hasta 1 200° C se emplean termocuplas de chromel-alumel; para temperaturas más altas son imprescindibles las de platino-rodio.

Los pirómetros termoeléctricos permiten medir temperaturas de superficies como la de los rodillos empleados en la fabricación de papel, la de los cilindros de un motor de explosión, etc. Un ejemplo interesante: cuando se lamina el cinc es importante que la temperatura no supere los 200° C. Como el cinc se calienta por el mismo proceso de laminación, es necesario medir la temperatura del cinc cuando se está laminando; para tal fin se construye una termocupla con un terminal de punta muy aguda que se pone en contacto con el cinc; ese contacto es la soldadura caliente. La soldadura fría se realiza en el interior del aparato de medida. De esta manera se obtiene un aparato muy flexible y cómodo.

Para terminar, citemos otra aplicación de las termocuplas que ha sido empleada en los últimos años. Se trata del uso de una cantidad de termocuplas acopladas en serie formando un grupo generador de energía eléctrica aprovechando la energía calórica del sol.

Problemas

1. La f. e. m. de una pila de Daniell vale 1,10 V; su resistencia interna mide 1 ohm. Los bornes se unen con un alambre de 19 ohms de resistencia. Calcular la intensidad de corriente que circula; la caída interna de potencial en la pila; la energía eléctrica consumida por segundo en la resistencia externa; y la cantidad de cinc consumido en 1 hora.

R.: 0,055 A; 0,055 V; 0,05 J; 0,06 g

2. La pila del problema anterior se conecta en oposición con otra pila de 10 V, formando ambas un circuito de resistencia total igual a 9 ohms. Calcular la intensidad de corriente en el nuevo circuito y los pesos de cobre y cinc desplazados en 1 hora.

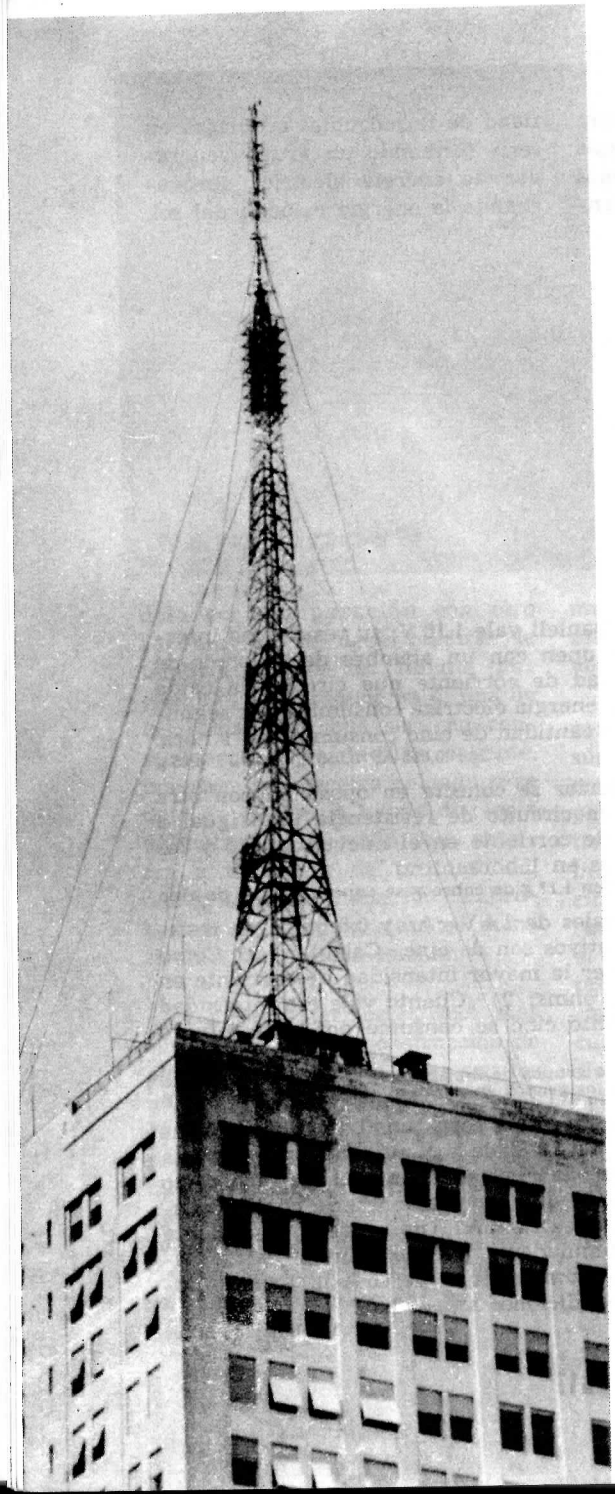
R.: 0,99; se consumen 1,17 g de cobre y se depositan 1,2 g de cinc

3. Se dispone de 12 pilas iguales de 1,4 V c/u. y 0,8 ohms de resistencia interna, cuyos bornes negativos son de cinc. Calcular: 1) Cómo habrá que agruparlas para obtener la mayor intensidad de corriente en un hilo cuya resistencia es de 0,6 ohms; 2) ¿Cuánto vale esa intensidad de corriente máxima?; 3) ¿Cuánto cinc se consume por cada minuto en cada pila?

R.: Hay que formar 4 grupos de 3 pilas cada uno, poniendo luego todos los grupos en paralelo entre sí; 3,5 A; 0,018 g

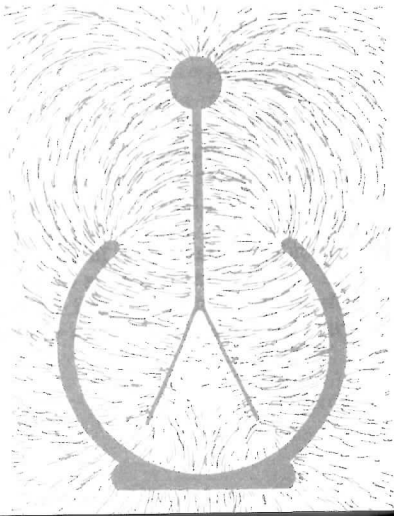
4. Con un dínamo de 100 V de f. e. m. se carga una batería de 20 acumuladores acoplados en serie y de 2,2 V de f. e. m. cada uno, a plena carga. Calcular: 1) Sabiendo que la resistencia interna de la dínamo es de 1 ohm, ¿qué resistencia habrá que conectar en serie con los acumuladores para que la intensidad sea de 6 A? (no se tienen en cuenta las resistencias internas de los acumuladores, pues son muy bajas; 2) Sabiendo que la capacidad de cada acumulador es de 60 A-h, ¿cuánto durará el proceso de carga en las condiciones antedichas?

R.: 10 ohms; 10 horas



VI

LOS CAMPOS



Las cargas eléctricas y las masas magnéticas crean a su alrededor los correspondientes campos eléctrico y magnético. Es de suma importancia estudiar las características y propiedades de los mismos, pues ellos dan una idea clara de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

"... he preferido buscar la explicación de los hechos, suponiendo que los producen acciones que se desarrollan tanto en el medio que los rodea, como en los cuerpos excitados. La teoría que propongo puede llamarse, pues, teoría del campo electromagnético, porque se refiere al espacio vecino de los cuerpos eléctricos o magnéticos".

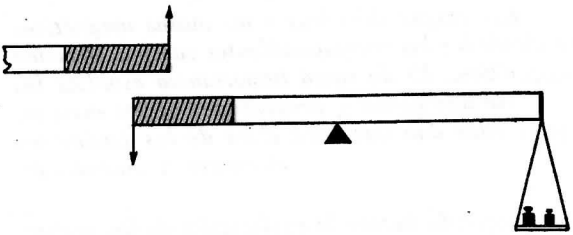
(JAMES CLERK MAXWELL, *A Dinamic Theory of the Electromagnetic Field*, 1865.)

21 EL CAMPO MAGNÉTICO

Advertencias

En este capítulo sólo nos referiremos a campos magnéticos creados por imanes; en el capítulo 22 estudiaremos los campos magnéticos creados por corrientes eléctricas.

Como sabemos, es imposible aislar un polo magnético de su compañero. Cuando en el texto hablemos de "un polo norte" o de "un polo sur" aislados, queremos decir siempre que nos estamos refiriendo a imanes *suficientemente largos, en los cuales la acción de un polo sobre los puntos vecinos al otro es prácticamente despreciable.*

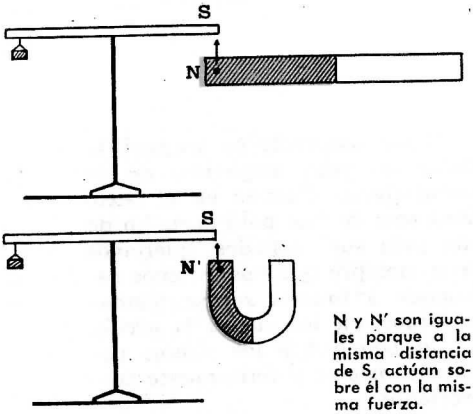


Esquema de una balanza magnética. La cruz de la balanza es una barra imanada de uno de cuyos extremos pende un platillo. El polo, cuya masa magnética se quiere medir, se coloca cerca del otro extremo, y como se repelen, para que la balanza quede en equilibrio, hay que colocar pesas en el platillo; el peso de éstas mide la fuerza de repulsión.

Fuerza magnética y distancia

Si acercamos un imán a una aguja, por ejemplo, sólo la levanta si está a cierta distancia de la misma. La balanza magnética permite saber *cómo varía* la fuerza con la distancia; con ella se comprueba que si a una distancia de 18 cm entre polos, por ejemplo, la fuerza es de $12\,\vec{g}$, a distancia doble (36 cm), la fuerza vale sólo $3\,\vec{g}$ (la cuarta parte); si la distancia se hace triple (54 cm), la fuerza se reduce a la novena parte $1{,}33\,\vec{g}$, etc. Es decir:

La fuerza de atracción o de repulsión entre dos polos magnéticos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.



N y N' son iguales porque a la misma distancia de S, actúan sobre él con la misma fuerza.

Intensidad de polo o masa magnética

Pero no sólo la distancia influye en el valor de la fuerza magnética. Sabemos que hay imanes más o menos intensos. *Para expresar la diferente intensidad* de los polos magnéticos *se supone* que en cada polo está concentrada cierta cantidad de magnetismo, cantidad a la que se llama *masa magnética*. En el polo N hay una cierta masa magnética N, exactamente igual a la masa magnética S que hay en el polo S.

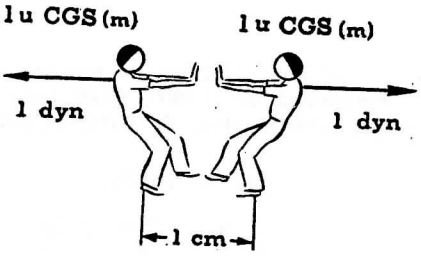
La balanza magnética permite definir con mayor precisión: *dos polos tienen la misma masa magnética cuando, colocados a igual distancia del polo de la balanza, ésta indica la misma fuerza.*

¿Cómo medir una masa magnética? Si tomamos el polo de una varilla como unidad, podemos

comparar en la balanza –que de este modo sirve para medir masas magnéticas– dicho polo con cualquier otro. Pero de esta manera la masa magnética resulta medida en unidades arbitrarias, sin relación con las unidades de los sistemas conocidos. Definamos así la unidad CGS de masa magnética:

Un polo magnético tiene 1 unidad CGS de masa magnética cuando atrae o repele a otro igual, colocado a la distancia de 1 cm, con la fuerza de 1 dina.

CONVENCIÓN. A las masas magnéticas N se les atribuye signo positivo, y a las S, negativo.



Ley de Coulomb

La balanza también enseña que la fuerza de atracción entre dos masas magnéticas m y m' es directamente proporcional al producto de dichas masas. Uniendo en una sola expresión este resultado con el anterior:

La fuerza magnética entre dos polos de masas m y m' es directamente proporcional al producto de dichas masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d que las separa.

O sea:

$$F = \frac{m\,m'}{d^2}$$

(Ley de Coulomb)

EJEMPLOS: *Calcular con qué fuerza se rechazan dos masas magnéticas S de 100 u CGS cada una, situadas a una distancia de 10 cm.*

$$F = \frac{m\,m'}{d^2}$$

$$\therefore\ F = \frac{100\text{ u CGS }(m\,m)\cdot 100\text{ u CGS }(m\,m)}{(10\text{ cm})^2}$$

$$\therefore\ F = 100\text{ dyn}$$

Calcular con qué fuerza se atraen dos masas magnéticas, una N, de 100 u CGS, y la otra S, de 2 000 u CGS, situadas a 1 m de distancia.

$$F = \frac{m\,m'}{d^2}$$

$$F = \frac{100\text{ u CGS }(m\,m)\cdot 2\,000\text{ u CGS }(mm)}{(100\text{ cm})^2}$$

$$F = 20\text{ dyn}$$

¿A qué distancia de una masa magnética de 1 000 u CGS habrá que ubicar otra, de 5 000 u CGS, para que la fuerza de repulsión sea de 2 $\vec{g}$?

($1\ \vec{g} = 980$ dyn)

$$F = \frac{m\,m'}{d^2} \therefore d^2 = \frac{m\,m'}{F}; \quad F = 2 \cdot 9{,}80 \text{ dyn}$$

$$\therefore d = \sqrt{\frac{m \cdot m'}{F}} = \sqrt{\frac{1\,000 \cdot 5\,000}{2 \cdot 980}} \cong \sqrt{\frac{1\,000 \cdot 5\,000}{2 \cdot 1\,000}}$$

$$d \cong 50 \text{ cm}$$

¿Cuánto vale una masa magnética N, sabiendo que, colocada a 1 mm de otra S, de 500 u CGS, la atrae con una fuerza de 1 $\vec{mg}$?

Siempre hay que comenzar expresando todo en u CGS.

$$F = 1\ \vec{mg} = 0{,}001\ \vec{g} \cdot 980 \text{ dyn} \cong 1 \text{ dyn}$$

$$d = 1 \text{ mm} = 0{,}1 \text{ cm}$$

$$F = \frac{m\,m'}{d^2} \therefore m' = \frac{F \cdot d^2}{m}$$

$$\therefore m' = \frac{1 \text{ dyn} \cdot 0{,}01 \text{ cm}^2}{500 \text{ u CGS}}$$

$$\therefore m' = \frac{1}{50\,000} \text{ u CGS}$$

Ley de Coulomb y ley de Newton

Es extraordinaria la semejanza entre la ley de Newton, de atracción universal, y la ley de Coulomb, que acabamos de enunciar.

En ambas, la fuerza es proporcional al producto de una magnitud, que depende de los cuerpos (masa magnética en un caso y masa mecánica en otro), e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Es muy posible que Coulomb haya tenido en cuenta la ley de Newton al buscar la relación entre las fuerzas magnéticas. Más aún: es muy probable que, al comprobar que la fuerza era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, Coulomb haya pensado en inventar una magnitud como la masa magnética, que desempeñara en su fórmula, una función análoga a la de la masa mecánica en la fórmula de Newton. Porque si se piensa en la definición de masa magnética, se verá que sólo tenemos pruebas *indirectas* de su existencia, puesto que es imposible aislar una masa magnética. Aquí también hay una diferencia notable no sólo con la masa mecánica, sino también con la carga eléctrica: en un conductor podemos decir que hay una carga de tantos coulombs. En magnetismo, cuando decimos que una masa magnética es de 100 u CGS, no es más que una convención, una manera de simplificar las difíciles leyes magnéticas.

Por último, queremos insistir en que desde ningún punto de vista deben confundirse conceptos absolutamente diferentes como masa mecánica y masa magnética.

Un cuerpo de gran masa mecánica, un mueble, por ejemplo, tiene muchísimo menos masa magnética que la aguja de una pequeña brújula.

EL INGENIERO COULOMB. Carlos Agustín de Coulomb fue un físico e ingeniero militar francés. Nació en Angulema en 1736 y murió en París en 1806. Desde muy joven trabajó en el cuerpo de ingenieros del ejército, distinguiéndose por sus trabajos de fortificación y por las investigaciones científicas que realizaba al mismo tiempo, cuando sus ocupaciones militares se lo permitían; esto ocurría en la época de la Revolución Francesa.

Coulomb dejó numerosos trabajos de gran valor sobre electricidad y magnetismo. La ciencia ha perpetuado su memoria designando con la palabra *coulomb* una de sus más importantes unidades.

Intensidad de campo magnético

Para revelar la existencia de un campo magnético podemos utilizar un "detective" muy sencillo: una pequeña brújula. La desviación de su aguja revela inmediatamente la existencia de cualquier campo, aunque su "agente productor" sea invisible para nosotros.

Si queremos comparar intensidades de campo, necesitaremos una brújula "patrón": a mayor desviación de la aguja de la brújula patrón, mayor intensidad de campo.

¿Cómo expresar la intensidad de campo en un punto? Lo más natural es hacerlo mediante la fuerza que actúa sobre la unidad de masa magnética colocada en ese punto. Si nuestra brújula tiene una masa magnética m (podemos convenir en elegir la masa norte), y la fuerza que sobre ella actúa es F, cuando está colocada en el punto P, llamaremos intensidad de campo magnético H en el punto P al cociente entre la fuerza F y la masa magnética m;

$$H = \frac{F}{m}$$

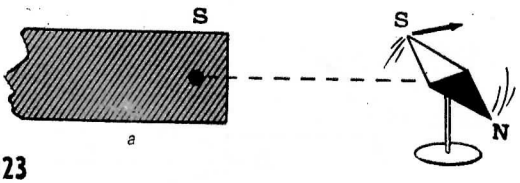
Este cociente representa el valor de la fuerza que actúa sobre cada unidad de masa magnética colocada en el punto.

Si se mide la fuerza en dinas y la masa magnética en u CGS, resulta la u CGS de campo, llamada *Oersted* (antes se la llamaba Gauss). Es decir:

$$1\ \text{Oe} = \frac{1\ \text{dyn}}{1\ \text{u CGS}\ (m\ m)}$$

La intensidad de un campo magnético en un punto vale 1 Oe cuando la fuerza ejercida sobre una masa magnética de 1 u CGS colocada en ese punto vale 1 dina.

EJEMPLOS: *Calcular el campo magnético en un punto, sabiendo que si en él se coloca una masa magnética de 100 u CGS, la fuerza que actúa sobre ella vale 2 000 dinas.*



a

$$H = \frac{F}{m}$$

$$\therefore H = \frac{2\,000 \text{ dyn}}{100 \text{ u CGS } (m\,m)} = 20 \frac{\text{dyn}}{\text{u CGS } (m\,m)}$$

$$H = 20 \text{ Oe}$$

El campo magnético en un punto vale 10 Oe. ¿Cuánto vale la fuerza que actuará sobre una masa de 200 u CGS colocada en ese punto?

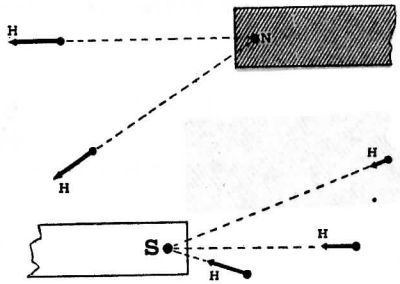
$$H = \frac{F}{m} \therefore F = H \cdot m$$

$$\therefore F = 10 \text{ Oe} \cdot 200 \text{ u CGS } (m\,m)$$

$$F = 2\,000 \text{ dyn}$$

Sentido y dirección de H

H *es un vector*, y la fórmula F/m sólo nos da el *módulo* de H, pero no su sentido y dirección. El inconveniente se salva fácilmente: asignamos a $\vec{H}$ el sentido y dirección de $\vec{F}$. Si el campo es creado por una masa magnética S, $\vec{H}$ estará representado por un vector de módulo F/m apuntando hacia la masa creadora; si en cambio la masa creadora es N, el vector estará dirigido en sentido opuesto, como indican las figuras.



Relación entre H y la masa creadora de campo

La experiencia nos enseña que cuando mayor es la masa M creadora del campo, mayor es H en cada punto. La relación entre ellos es muy útil en el cálculo de campos:

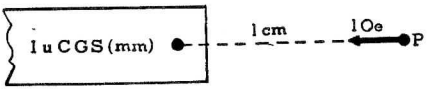
Por la ley de Coulomb,

$$F = \frac{m\,M}{d^2} \therefore \frac{F}{m} = \frac{M}{d^2}$$

y como $\frac{F}{m} = H$

$$\therefore H = \frac{M}{d^2}$$

Podemos ahora definir la unidad de campo magnético de la siguiente manera: *1 Oe es la intensidad de campo magnético creado por una masa magnética de 1 u CGS a 1 cm de distancia.*



EJEMPLOS: *Calcular la intensidad de campo magnético en un punto situado a 5 cm de una masa magnética de 200 u CGS.*

$$H = \frac{M}{d^2} = \frac{200 \text{ u CGS } (m\,m)}{(5 \text{ cm})^2}$$

$$\therefore H = \frac{200 \text{ u CGS } (m\,m)}{25 \text{ cm}^2}$$

$$H = 8 \text{ Oe}$$

El campo magnético, en un punto situado a 2 mm de una cierta masa magnética, vale 100 Oe. ¿Cuánto vale la masa magnética?

$$H = \frac{M}{d^2} \therefore M = H \cdot d^2$$

$$\therefore M = 100 \text{ Oe} \cdot (2 \text{ mm})^2$$

$$M = 100 \text{ Oe} \cdot (0{,}2 \text{ cm})^2 =$$

$= 100 \text{ Oe} \cdot 0{,}04 \text{ cm}^2$

$M = 4 \text{ u CGS } (m\,m)$

Comparación con el campo gravitatorio

Recordemos que el campo gravitatorio creado por la Tierra a una distancia d vale

$$g = k \cdot \frac{M}{d^2},$$

siendo M la masa de la Tierra, y k, la constante de la gravitación universal.

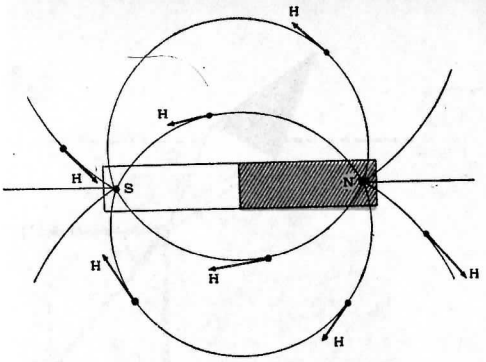
Como se ve, una nueva analogía entre ambos campos. Por supuesto que ella resulta de la analogía que hay entre la ley de Newton y la ley de Coulomb.

Estas analogías resultan muy importantes, pues ayudan a comprender todo lo referente al campo magnético, ya que el campo gravitatorio es más accesible a nuestra mente, pues su influencia sobre nosotros es muy grande.

Intensidad de campo y líneas de fuerza

Para conocer la dirección y sentido de $\vec{H}$ en forma rápida, es muy útil la regla siguiente: *en cada punto del campo, $\vec{H}$ es tangente a la línea de fuerza que pasa por dicho punto, y tiene su mismo sentido.*

La regla resulta del razonamiento siguiente: las limaduras de hierro espolvoreadas en un campo magnético, se orientan según las líneas de fuerza. Como la orientación es producida por la intensidad de campo, cada limadura es un pequeño imán que sigue la dirección y sentido del vector H, en cada punto.



El campo es tangente a las líneas de fuerza en cada punto.

Síntesis de las propiedades de las líneas de fuerza

Las distintas propiedades aprendidas sobre las líneas de fuerza son:

1) Toda línea de fuerza nace en un polo N y termina en un polo S;

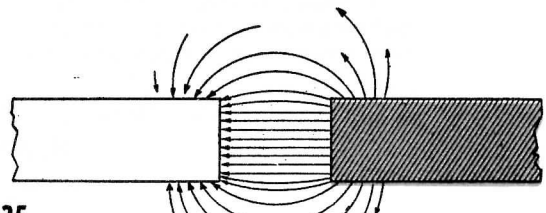
2) Su sentido es de N a S;

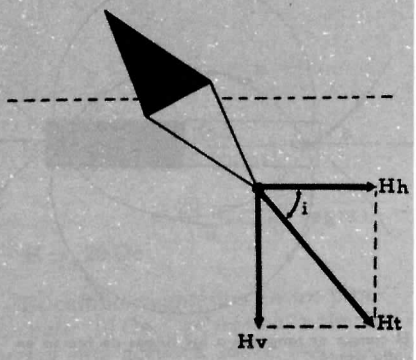
3) El campo $\vec{H}$ es en cada punto tangente a la línea de fuerza que pasa por él;

4) Dos líneas de fuerza del mismo campo no se cortan;

5) La densidad de líneas de fuerza da una indicación de la intensidad del campo.

En la zona central entre los dos polos el campo magnético es uniforme.





Componentes del campo magnético terrestre.

Campo magnético uniforme

Un campo magnético es uniforme, si sus líneas de fuerza son paralelas y están igualmente espaciadas, es decir, si tiene el mismo valor en todos los puntos. Tal es el campo que se forma en la zona central del entrehierro, que muestra la figura. En los bordes, el campo deja de ser uniforme, porque las líneas se deforman.

Intensidad del campo magnético terrestre

Si suspendemos una aguja magnética por su centro de gravedad, se orienta en la dirección del campo magnético terrestre. Ese vector se puede descomponer en dos: H_h, componente horizontal del campo terrestre, y H_v, componente vertical del campo terrestre.

Como muestra la figura, resulta:

$$\vec{H}_h = \vec{H}_t \cdot \cos i$$

$$\vec{H}_v = \vec{H}_t \cdot \operatorname{sen} i$$

En una brújula de declinación (gira en el plano horizontal) es H_h la componente que actúa sobre ella, ya que H_v es anulada por el tornillo que le impide moverse en el plano vertical. Lo contrario ocurre en la brújula de inclinación, donde actúa H_v y está anulada H_h.

EJEMPLOS: *Calcular las componentes vertical y horizontal del campo magnético terrestre de un lugar a 45° de inclinación, donde el campo terrestre vale 0,2 Oe.*

$$H_v = \vec{H}_t \cdot \operatorname{sen} i = 0{,}2 \text{ Oe} \cdot \operatorname{sen} 45°$$

$$\text{pero } \operatorname{sen} 45° = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \therefore \quad \vec{H}_v = 0{,}2 \text{ Oe} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 0{,}14 \text{ Oe}$$

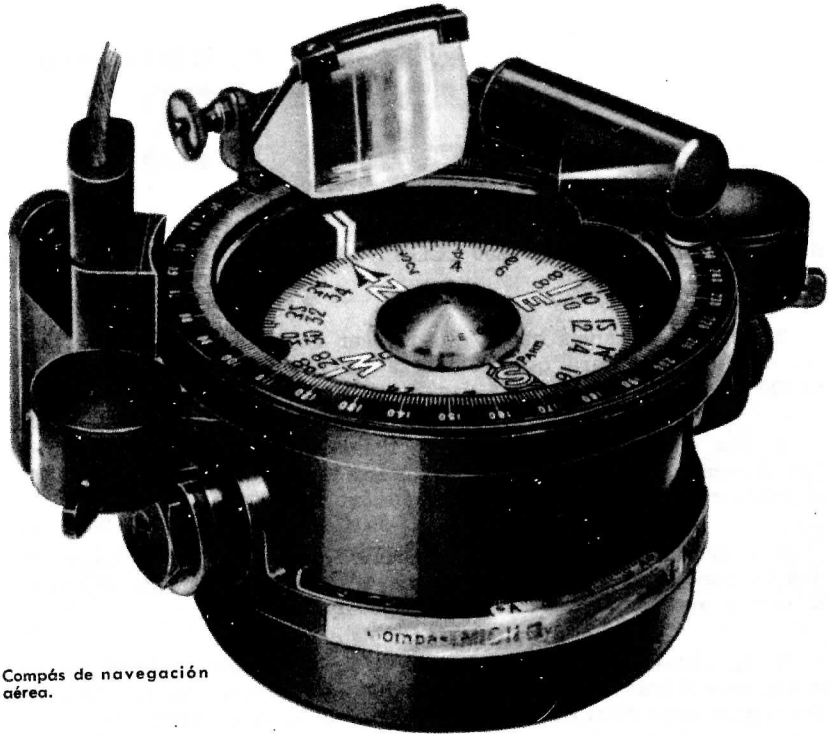
$$\vec{H}_h = \vec{H}_t \cdot \cos i = 0{,}2 \text{ Oe} \cdot \cos 45°$$

$$\text{Como } \cos 45° = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \therefore \quad \vec{H}_h = 0{,}2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 0{,}14 \text{ Oe}$$

Calcular la intensidad total del campo magnético terrestre en Buenos Aires, si la componente horizontal vale 0,23 Oe, y la inclinación es de − 30°.

$$\vec{H}_h = \vec{H}_t \cos i \quad \therefore \quad H_t = \frac{H_h}{\cos i} = \frac{0{,}23 \text{ Oe}}{0{,}866}$$

$$H_t \cong 0{,}25 \text{ Oe}$$



Compás de navegación aérea.

La contribución del magnetismo en la obtención de las bajas temperaturas

Se ha observado que cuando se magnetiza en forma adiabática una sustancia paramagnética, su temperatura aumenta, análogamente a lo que ocurre con un gas cuando se lo comprime. Lo interesante es que también existe el efecto inverso: si se desmagnetiza adiabáticamente una sustancia, ésta se enfría.

Este descubrimiento abrió un nuevo campo en la lucha por la obtención de 0° K. Así fue como en 1933 se logró una temperatura de 0,25° K por desmagnetización adiabática del sulfato de gadolinio. En 1935, de Haass y Wierma llegaron a 0,0034° K desmagnetizando una mezcla de alumbre de cromo y potasio, que estaba inicialmente a una temperatura de 1,29° K (obtenida con helio hirviendo a baja presión) y trabajando con un campo magnético de 25 000 Oe, que se anula rapidísimamente.

1. Calcular la fuerza, en dyn, Kg y N (Newton), con que se atraen dos masas magnéticas de 200 u CGS y 800 u CGS separadas por una distancia de 8 cm

R.: 2 500 dyn; 0,025 N; 0,0025 kg

2. ¿A qué distancia habrá que colocar dos masas magnéticas iguales de 10 u CGS para que la fuerza de repulsión entre ellas valga 62 500 dyn?

R.: 0,04 cm

3. Dos masas magnéticas de 18 y 24 u CGS cada una se atraen con una fuerza de 3 dyn. Calcular la intensidad del campo magnético en el punto medio de la distancia entre ellas.

R.: 0,29 Oe

4. Calcular la intensidad de un campo magnético en un punto, sabiendo que si en él se coloca una masa magnética norte de 100 u CGS la fuerza que actúa sobre ella es de 500 dyn.

R.: 5 Oe

5. La distancia entre los polos de un imán en barra vale 12 cm. Las masas magnéticas de ese imán valen 100 u CGS. Calcular la intensidad del campo magnético de un punto situado a 12 cm de cada polo.

R.: 0,7 Oe

6. En el problema anterior, calcular la intensidad del campo magnético en el punto medio del triángulo determinado por el punto dado y los dos polos del imán.

R.: 3,6 Oe

7. La componente horizontal del campo magnético terrestre vale 0,25 Oe en un lugar donde la inclinación magnética es de 30°. Calcular la intensidad total del campo terrestre en ese lugar y el valor de la componente vertical.

R.: 0,3 Oe; 0,15 Oe

8. Los polos de un imán recto, de 20 u CGS de masa magnética están situados a 25 cm de distancia. Se lo suspende horizontalmente en el campo terrestre. Separado 30° de su posición de equilibrio, y en el plano horizontal, actúa sobre él una cupla de 0,06 g/cm. ¿Cuál es la intensidad de la componente horizontal del campo terrestre en ese lugar?

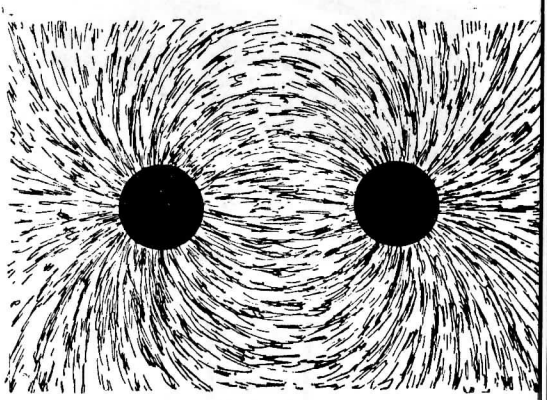
R.: 0,235 Oe

9. Por una superficie de 4 dm^2, vertical y perpendicular al meridiano magnético pasan 94 líneas de fuerza. ¿Cuánto vale la componente horizontal del campo terrestre en el lugar considerado?

R.: 0,235 Oe

22 EL CAMPO ELÉCTRICO

Campo eléctrico es toda la región del espacio donde existen fenómenos eléctricos. La existencia de un campo eléctrico se manifiesta mediante la formación de su espectro. En las figuras de esta página se muestran algunos espectros eléctricos, en donde la distribución de las líneas de fuerza da la forma de los campos.



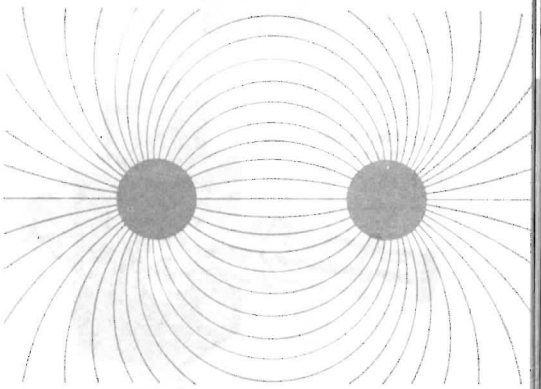
Campo eléctrico de dos esferas cargadas de signos contrarios: Las dos esferas forman un condensador (de "Electricidad", de Pohl).

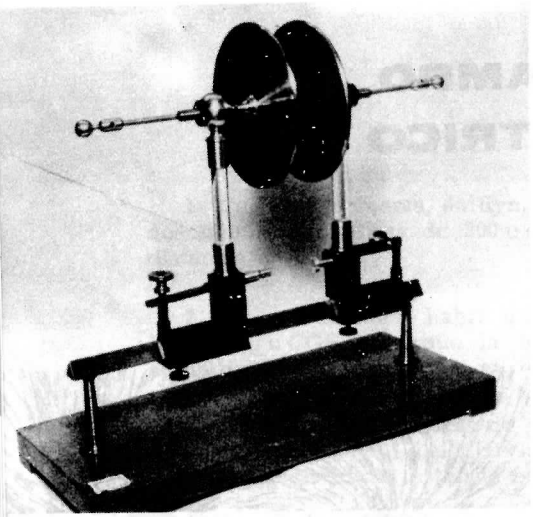
Condensadores

Dos cuerpos forman un condensador cuando entre ellos existe, o puede existir, un campo eléctrico.

Para estudiar las propiedades de un campo eléctrico, comenzaremos por uno sencillo: el que se forma entre dos discos metálicos colocados frente a frente (es lo que se llama un *condensador plano*). El espectro de dicho campo muestra una particularidad importante; las líneas de fuerza son paralelas y están distribuidas uniformemente, lo que significa que el campo es uniforme (tiene el mismo valor en todos sus puntos).

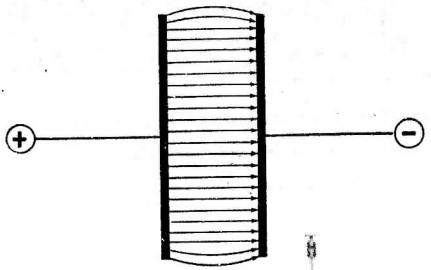
Dibujo geométrico correspondiente al campo anterior.

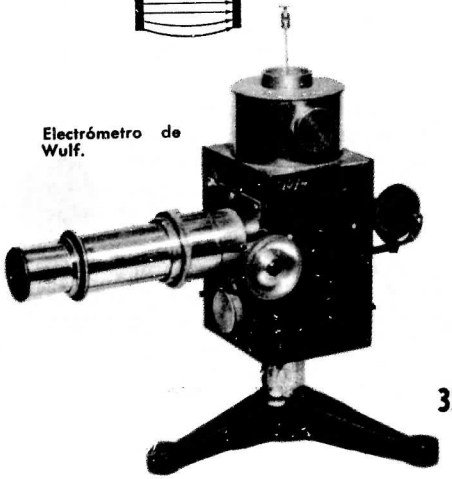




Condensador plano de demostración.

Campo entre las placas de un condensador plano.





Electrómetro de Wulf.

Tensión entre las placas de un condensador

¿Qué ocurre si unimos un condensador a una fuente de tensión continua? Como entre las placas del condensador hay aire, y éste es aislador, el circuito está interrumpido y no circula corriente. Pero entre ambas placas se ha creado un campo eléctrico como lo muestra el espectro correspondiente. Si después conectamos el mismo condensador a otra fuente de tensión, el espectro varía, indicando así que existe una *relación* entre *la tensión y el campo.*

Pero no podemos ir más allá sin un medidor de tensión adecuado. Como no circula corriente, no podemos utilizar voltímetros de los empleados en los circuitos, sino voltímetros que funcionen sin necesidad de corriente. Tales son los *voltímetros electrostáticos*, llamados también *electrómetros*, de los que existen varias clases. Nosotros utilizaremos el *voltímetro electrostático bifilar*, o *electrómetro de Wulf.*

Es, simplemente, un electroscopio modificado. La parte fundamental del aparato consiste en los dos hilos metálicos h y h' –preferentemente, de platino–, unidos en la parte superior al contacto A, y en la inferior al hilo de cuarzo P. Los dos hilos se hallan dentro de una caja metálica –que posee dos marquitos de alambre a y a'–, cuyo borne M sirve para efectuar conexiones. Si se conectan A y M a una cierta tensión, los hilos –que reciben una cierta carga– se rechazan entre sí, y la separación depende de la carga aplicada. El

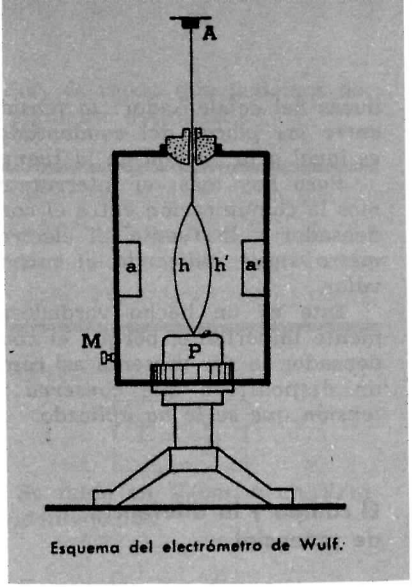
electrómetro posee una escala graduada, para medir la separación, que se observa mediante un ocular.

Para emplearlo se debe calibrar el aparato en volts de manera de poder saber cuántos volts mide cuando la escala indica un determinado valor. Para la calibración se procede en la forma que indica la figura: A y B están conectados a una fuente de tensión continua. Entre ellos se instala un potenciómetro; al mover el cursor D se tienen potenciales variables –que se miden con el voltímetro V–, aplicados al electrómetro; leyendo las indicaciones de la escala y del voltímetro se obtiene la curva de calibración del aparato. Por ejemplo: en la calibración de un aparato se han obtenido los resultados siguientes:

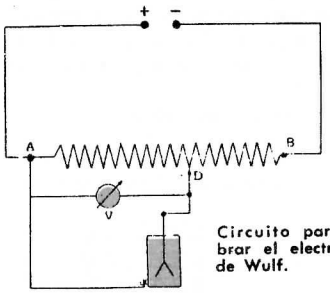
Lectura en el electrómetro	*Lectura en el voltímetro*
0 divisiones	0 volts
0,9 „	10 „
2,8 „	20 „
5,2 „	30 „
8,1 „	40 „
12,1 „	50 „
15,6 „	60 „

Por lo tanto, si al utilizar el electrómetro de Wulf en una medición observamos que él indica 8,1, sabemos que eso corresponde a una tensión de 40 V.

Ahora podemos medir la diferencia de potencial entre las placas de un condensador al conectarlo a una fuente de tensión conocida. Para esto conectamos el condensador a la fuente de tensión, y el electrómetro a las arma-

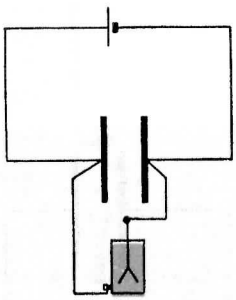


Esquema del electrómetro de Wulf.



Circuito para calibrar el electrómetro de Wulf.

Cómo se mide la diferencia de potencial entre las placas de un condensador con el Wulf.



duras del condensador: *la tensión entre las placas del condensador es igual a la tensión de la fuente.*

Pero hay más: si interrumpimos la comunicación entre el condensador y la fuente, el *electrómetro sigue indicando el mismo valor.*

Éste es un hecho verdaderamente importante, porque el condensador se nos presenta así como un dispositivo que *conserva la tensión que se le ha aplicado.*

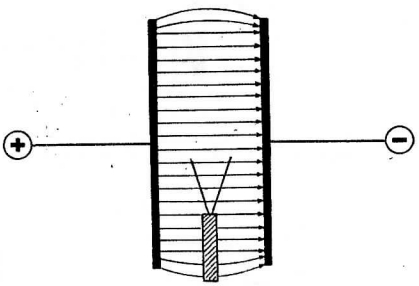
El campo y la diferencia de potencial

Para comparar intensidades de campo utilizamos el dispositivo de la figura: dos delgados hilos metálicos sostenidos mediante un mango aislador. Si se lo coloca en un campo eléctrico, los dos hilos se separan. Cuanto mayor es la separación, más intenso es el campo eléctrico. Dos campos eléctricos iguales pueden definirse diciendo: son aquellos que producen la misma separación de hilos del mismo indicador. Las apreciaciones cualitativas de este aparatito prueban, como veremos, la estrecha vinculación entre la tensión y el campo.

Para ello, realicemos las siguientes experiencias:

Detector de campo eléctrico.

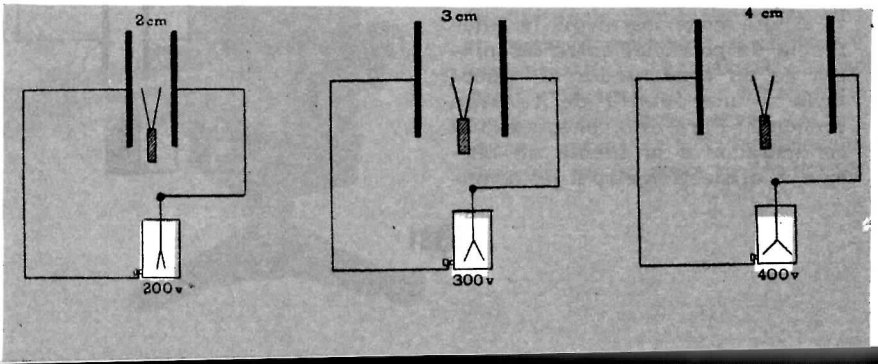
Cómo se usa el indicador de campo.



a) Conectemos nuestro condensador a 200 V, por ejemplo. Desconectemos. El electrómetro sigue indicando 200 V. En nuestro medidor de campo se produce una cierta separación entre las hojuelas. Anotemos también la distancia d entre placas; supongamos que valga 2 cm. Realicemos el cociente:

$$\frac{V}{d} = \frac{200\ V}{2\ cm} = 100\ \frac{V}{cm}$$

b) En las mismas condiciones anteriores, alejemos una placa de la otra, hasta que la distancia sea de 3 cm, por ejemplo. El electrómetro indica ahora 300 V (¡obsérvese que el condensador no ha sido vuelto a poner en contacto con la fuente de tensión!). Pero *el indicador de campo marca la misma separación.* Por lo tanto, entre ambas placas *sigue existiendo el mismo campo eléctrico.*



Obsérvese que separar más las placas equivale a alargar las líneas de fuerza. Un alargamiento de las líneas de fuerza produce un aumento de la tensión entre los extremos. Algo análogo a lo que ocurre si alargamos un elástico o un resorte.

c) En las mismas condiciones anteriores, aumentamos la distancia entre placas, hasta que $d = 4$ cm. El electrómetro indica ahora 400 V. Pero el indicador de campo sigue marcando la misma separación. El campo continúa, pues, invariable.

Podemos realizar más experiencias análogas –por ejemplo mediante un potenciómetro, que permite variar la tensión a voluntad–, y siempre llegaríamos a las mismas conclusiones:

1) *La tensión entre placas aumenta al aumentar la separación entre ellas.*

2) *La tensión entre placas disminuye al disminuir la separación entre ellas.*

3) *El cociente* $\frac{V}{d}$ *permanece invariable en todos los casos.*

Pero también el campo eléctrico se mantiene invariable en todos los casos, como lo muestra el indicador, de modo que podemos dar la siguiente definición:

Se llama intensidad del campo eléctrico uniforme de un condensador al cociente entre la diferencia de potencial entre sus placas y la distancia que las separa.

O sea:

$$\boxed{E = \frac{V}{d}}$$

Se mide en V/cm, o en V/m. Evidentemente,

$$1\ V/cm = 100\ V/m$$

EJEMPLOS: *La distancia entre placas de un condensador plano es de 20 cm. ¿Cuánto vale el campo que se crea entre placas al aplicar una d. d. p. de 200 V?*

$$E = \frac{V}{d} = \frac{200\ V}{20\ cm} = 10\ \frac{V}{cm}$$

La intensidad de campo entre las placas de un condensador plano vale 5 V/cm, y la distancia entre placas es de 10 cm. Calcular la diferencia de potencial entre placas. ¿Qué diferencia de potencial habrá entre una placa y el punto medio de la distancia entre placas?

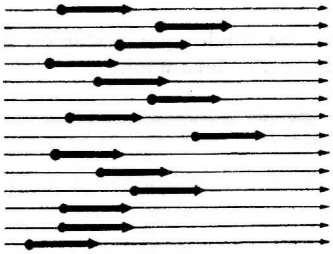
$$E = \frac{V}{d} \therefore\ V = E\,d = 5\,\frac{V}{cm} \cdot 10\ cm = 50\ V$$

$$V' = E\,d' = 5\,\frac{V}{cm} \cdot 5\ cm = 25\ V$$

Sentido y dirección de E

$\vec{E}$ es un *vector* cuya dirección es tangente a la línea de fuerza en cada punto, y cuyo sentido es

E es tangente a la línea de fuerza en cada punto.



el de la línea de fuerza (es decir, de las cargas + a las cargas −).

En el caso de un campo uniforme, la dirección de E coincide con la de la línea de fuerza que pasa por cada punto.

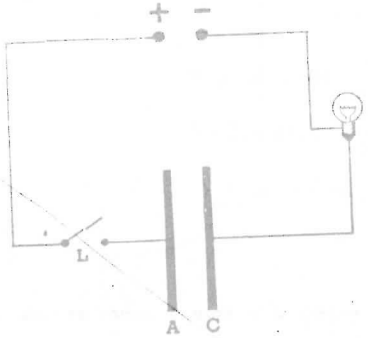
Síntesis de las propiedades de las líneas de fuerza

Recapitulemos las propiedades más importantes de las líneas de fuerza, pues deberemos utilizarlas a menudo:

1) Toda línea de fuerza nace en una carga positiva y termina en una negativa.

2) Su sentido es del + al −.

3) El campo $\vec{E}$ es en cada punto, un vector tangente a la línea de fuerza que pasa por dicho punto.



4) Dos líneas de fuerza de un mismo campo no pueden cortarse.

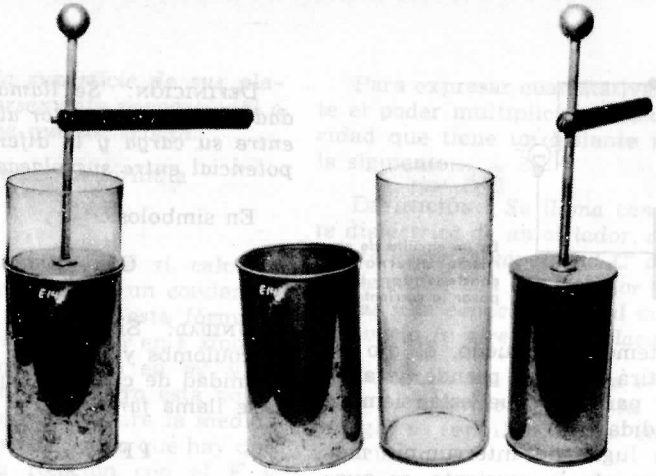
5) En el interior de los conductores cargados y en equilibrio, no hay líneas de fuerza (campo nulo).

Carga y descarga de un condensador

Al conectar un condensador con una fuente de tensión, aquél adquiere esa tensión, y se establece un campo entre sus placas. ¿Cómo se interpreta, electrónicamente, este fenómeno?

Si realizamos la experiencia que indica la figura de pie de página, tendremos la respuesta: al cerrar la llave L, la lamparita brilla durante un tiempo brevísimo. Es decir que el generador ha transportado electrones desde A hasta C. Ha circulado una corriente eléctrica, pero de tan breve duración, que la llamaremos "golpe de corriente" o "impulso de corriente". El condensador tiene, pues, una carga eléctrica: la armadura C tiene un exceso de electrones, de modo que está cargada negativamente. Y tiene tantos electrones como los que perdió A, que queda, así, cargada positivamente.

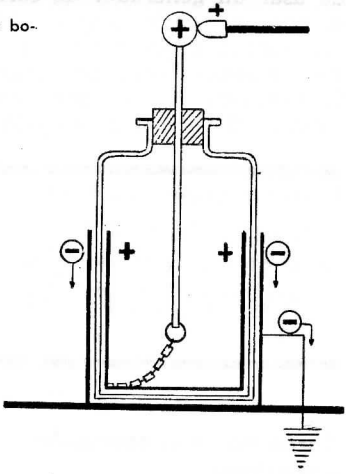
No debe extrañar, por lo tanto, si en lugar de un generador utilizamos una máquina electrostática para crear un campo. Los condensadores fueron descubiertos, precisamente, hace unos 200 años, en la Universidad de Leiden (Holanda), mientras se utilizaban máquinas electrostáticas, cuando aún no se habían inventado las pilas. En lugar de un condensador plano puede emplearse una botella de



Botella de Leiden desarmable; puede construirse con una botella de leche.

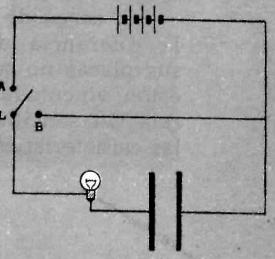
Leiden, que es sencillamente una botella, revestida exterior e interiormente con metal, como muestra la figura.

Entre las placas se establece el campo eléctrico que hemos descripto. ¿Qué ocurrirá si las unimos mediante un conductor? Habrá nuevamente un golpe de corriente, la lamparita vuelve a encenderse un brevísimo instante, y los hilos del electrómetro se unen, indicando que se ha anulado la diferencia de tensión. Se produjo un desplazamiento de electrones de C a A.

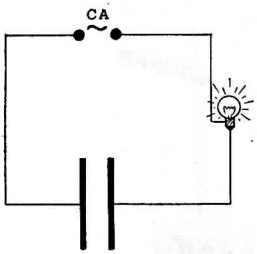


OBSERVACIÓN: En el golpe descarga, el sentido de la corriente electrónica es desde A hacia C; por lo tanto, el sentido técnico es desde C hacia A.

Es fácil, ahora, prever qué ocurrirá si se establece e interrumpe rápidamente la corriente, produciendo sucesivos golpes de carga y descarga: la lamparita se encenderá y apagará de acuerdo con el ritmo de los golpes, de modo que si éstos se producen continuamente, la lamparita estará encendida casi permanentemente, y si el intervalo entre los golpes es lo su-



Cuando la llave L hace contacto en A, el condensador se carga; cuando hace contacto en B, se descarga.



En un circuito de corriente alterna, el condensador deja pasar la corriente.

ficientemente pequeño, el ojo no advertirá que se prende y apaga, y parecerá que está siempre encendida.

En lugar de interrumpir mecánicamente la corriente, se puede usar un generador de corriente alterna, con lo cual se obtiene una corriente que cambia de sentido muchas veces por segundo. La corriente urbana, por ejemplo, cambia 50 veces por segundo.

En un circuito de corriente continua, un condensador bloquea la corriente.
En un circuito de corriente alterna, un condensador no evita el paso de la corriente.

Carga de un condensador. Capacidad

Cuando las placas de un condensador se conectan a una fuente de potencia, el condensador recibe una cierta carga eléctrica, a la que llamaremos q.

La carga de un condensador y la diferencia de potencial entre sus placas no son independientes: están vinculadas entre sí por una relación sencilla, que depende de las características del condensador.

DEFINICIÓN: *Se llama capacidad de un condensador al cociente entre su carga y la diferencia de potencial entre sus placas.*

En símbolos:

$$C = \frac{q}{V}$$

UNIDAD: Si la carga *se mide* en coulombs y la d. d. p. en volts, la unidad de capacidad que resulta se llama *faradio*:

$$1\,F = \frac{1\,C}{1\,V}$$

Como el faradio resulta una unidad demasiado grande, se usan sub-múltiplos:

1 microfaradio
$(\mu\,F) = 10^{-6}\,F$
1 micro microfaradio
$(\mu\,\mu\,F) = 10^{-12}\,F$

En la práctica, para valores menores de 1 μ F se omite al 0, poniendo en su lugar un punto; por ejemplo, .5 significa 0,5 μ F; .001 significa 0,001 μ F, etc.

EJEMPLOS: *¿Qué carga adquiere un condensador de 0,15 μ F si se lo conecta a una d. d. p. de 100 V?*

$$C = \frac{q}{V} \therefore\ q = CV = 0{,}15\,\mu F \cdot 100\ V$$

$$q = 0.15 \cdot 10^{-6}\,F \cdot 10^{2}\,V =$$

$$= 15 \cdot 10^{-4}\,C = 0{,}0015\,C$$

¿Qué capacidad tiene un condensador si una carga de 10^{-5} C provoca entre sus placas una d.d.p.

$$C = \frac{q}{V} = \frac{10^{-5}\,C}{10^{4}\,V} =$$

$$= 10^{-9}\,F = 10^{-3}\,\mu F$$

La capacidad de un condensador plano es directamente propor-

cional a la superficie de sus placas e inversamente proporcional a la distancia que los separa.

Expresadas en fórmula

$$C = \frac{S}{d}$$

Naturalmente que si calculamos la capacidad de un condensador plano aplicando esta fórmula, no obtenemos el valor en F sino en metros (midiendo S en m^2 y la distancia en m). Pero ésta no es unidad muy usada para la medida de capacidades, por lo que hay que conocer su relación con el F y efectuar la conversión correspondiente. Mediante experiencias cuidadosas se ha encontrado que:

Una capacidad de 1 m es igual a una capacidad de $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F.

EJEMPLO: *¿Cuál es la capacidad de un condensador formado por dos placas de $S = 100\ cm^2$, separadas por una $d = 2\ cm$?*

$$C = \frac{S}{d} = \frac{0{,}01\ m^2}{0{,}02\ m} = 0{,}5\ m$$

Para expresar el resultado en F, basta multiplicar por el factor de conversión

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ F/m \cdot 0{,}5\ m$$
$$C = 4{,}425 \cdot 10^{-12}\ F =$$
$$= 4{,}425 \cdot 10^{-6}\ \mu F = 4{,}425\ \mu\mu F$$

Constante dieléctrica de un aislador

Intercalando sustancias aislantes (mica, vidrio, agua destilada, goma, parafina, lacre, etc.) entre las placas de un condensador, en todos los casos se observa que la tensión disminuye, lo que significa que la capacidad aumenta.

Para expresar cuantitativamente el poder multiplicador de capacidad que tiene un aislante se da la siguiente:

DEFINICIÓN: *Se llama constante dieléctrica de un aislador, al cociente entre la capacidad C' de un condensador con ese aislador entre placas y la capacidad C del mismo con vacío (o aire) entre placas.*

La constante dieléctrica se designa comúnmente con la letra griega ε (épsilon). En consecuencia

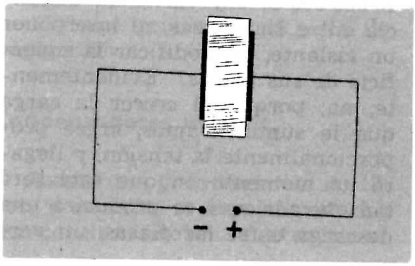
$$\varepsilon = \frac{C'}{C}$$

EJEMPLOS: *La constante dieléctrica del agua destilada vale 81, lo que significa que la capacidad de un condensador con agua entre sus placas es 81 veces mayor que con aire.*

Naturalmente la constante dieléctrica del aire vale 1, pues hemos tomado el aire como sustancia de comparación.

CONSTANTES DIELÉCTRICAS

Agua destilada	81
Alcohol	27
Azufre	3,5
Bakelita	5



Cemento	7,5
Ebonita	2,7
Gutapercha	4,5
Mármol	8
Papel parafinado	3,7
Resina	2,5
Aire	1,0
Vacío	1
Vidrio	5,5
Vidrio flint	10
Yeso	6,3
Madera	4,5

¿Cuál es la capacidad de un condensador plano formado por dos placas de $S = 300\ cm^2$ separadas por una $d = 1\ mm$ si entre sus placas hay bakelita?

$$C = \frac{S}{d} = \frac{0{,}03\ m^2}{0{,}001\ m} = 30\ m$$

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ F/m \cdot 30\ m = 26{,}55 \cdot 10^{-11}\ F$$

Ésta es la capacidad con aire; con bakelita

$C' = \varepsilon\ C = 5 \cdot 26{,}55 \cdot 10^{-11}\ F$

$C' = 132{,}75 \cdot 10^{-11}\ F$

Potencial de ruptura

Supongamos que un condensador tenga una capacidad de 2 F. ¿Podemos dar a ese condensador –sin modificarlo– toda la carga que se nos ocurra? Por ejemplo, ¿podemos darle una carga de 10 000 000 C, sin variar la distancia entre sus placas, ni interponer un aislante, ni modificar la superficie de sus placas? Evidentemente, no; porque al crecer la carga que le suministramos, crece proporcionalmente la tensión, y llegará un momento en que ésta será tan elevada, que se producirá una descarga entre las placas, un verdadero rayo. Esto sucederá aunque se coloque un aislante entre las placas, porque éstos no son perfectos. Ese potencial límite se llama *potencial de ruptura del aislante*. Supongamos que sea de 100 000 V. Entonces, ¿qué carga máxima podemos dar a este condensador de 2 F?

Una carga tal, que el potencial que adquiera con ella no supere al de ruptura. O sea:

$$q = C\ V = 2\ F \cdot 100\ 000\ V = 200\ 000\ C$$

Supongamos ahora que estando el condensador cargado con su carga máxima de 200 000 C, acercamos sus placas, o interponemos un aislante. Entonces la tensión disminuye y será inferior a 100 000 V. Ahora podemos dar más carga al condensador, superando los 200 000 C, que era el límite anterior, hasta que el potencial llegue nuevamente a los 100 000 V. Por eso se dice que cuando *disminuye* la tensión entre placas, *aumenta la capacidad* del sistema para recibir cargas.

El poder de un aislador y la constante dieléctrica

¿Qué ocurre si unimos las placas de un condensador mediante un aislador, en lugar de utilizar un conductor? Utilizando un aislador observaremos –en el electrómetro– que ocurre el mismo proceso que se realizaba casi instantáneamente con un alambre conductor, pero en un tiempo mayor. Conocemos la explicación: los aisladores –en realidad deberíamos llamarlos *malos* conductores– tienen muy pocos electrones libres, y la conducción a través de ellos es difícil.

Mediante esta experiencia, podemos comparar aisladores entre sí, comparando los tiempos que tardan en descargar un mismo condensador, siempre a igual tensión. Y podemos obtener una tabla de aisladores, como la siguiente:

Agua destilada
Alcohol
Vidrio Flint
Mica
Aceite de parafina
Azufre
Madera
Goma
Papel
Parafina

donde cada sustancia es más aislante que la que le sigue.

Pero nos aguarda una sorpresa: dijimos que la capacidad de un condensador aumenta si se le intercala un aislador entre placas. Si probamos con los aisladores de la tabla, encontraremos que aquellos que son más aislantes multiplican más la capacidad, es decir, tienen mayor constante dieléctrica. Resulta entonces que con la constante dieléctrica podemos expresar simultáneamente el poder aislador y el poder multiplicador de capacidades. Así, por ejemplo, el agua destilada tiene $\varepsilon = 81$, lo que significa que la capacidad de un mismo condensador con agua entre sus placas es 81 veces mayor que la capacidad del mismo cuando entre sus placas hay aire y significa también que el agua aísla 81 veces más que el aire.

EJEMPLOS: *La capacidad de un condensador sin dieléctrico vale 0,02 μ F. Se le interpone un dieléctrico, y su capacidad aumenta a 0,1 μ F. Calcular la constante dieléctrica del aislante interpuesto.*

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_r} = \frac{0{,}1\ \mu F}{0{,}02\ \mu F} = 5$$

El condensador del ejercicio anterior fue cargado a una tensión de 200 V, antes de interponer el dieléctrico. ¿Qué ocurre con la tensión cuando se interpone el dieléctrico? ¿Qué ocurre con el campo?

Llamando V_1 la tensión de 200 V y q la carga adquirida, resulta:

$$C_r = \frac{q}{V_1} \therefore\ q = C_r \cdot V_1 \quad (1)$$

Cuando le interponemos el dieléctrico, como la carga q no varía, resulta:

$$q = C_d\, V_2 \quad (2)$$

De (1) y (2)

$$C_r\, V_1 = C_d \cdot V_2 \therefore\ V_2 = \frac{C_r}{C_d} V_1 = \frac{1}{5} \cdot 200\ V = 40\ V$$

La tensión se redujo a la quinta parte.

Llamando E_1 al campo primitivo,

$$E_1 = \frac{V_1}{d}$$

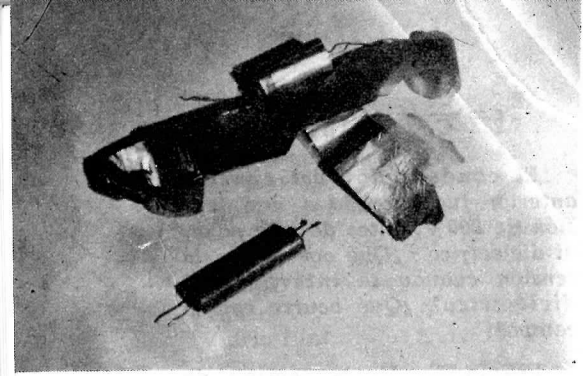
(d, distancia entre placas)

Acoplamiento de condensadores

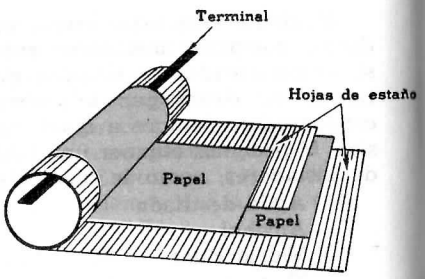
(Véanse problemas 12 y 13 de página 350.)

Condensadores usuales

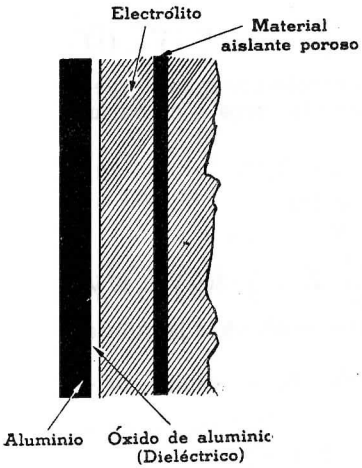
Existe una gran variedad de tipos, y en radio se emplean mucho los condensadores electrolíticos,



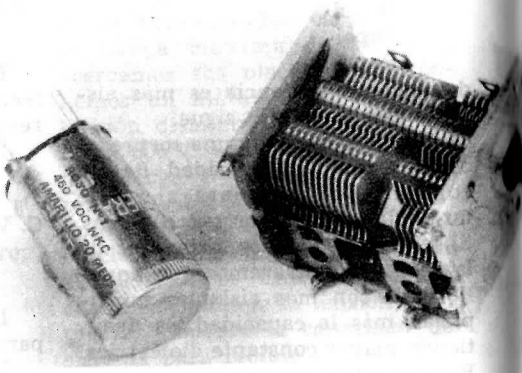
Condensador de papel.



Esquema de un condensador de papel.



Esquema de un condensador electrolítico.



Condensador electrolítico y condensador variable.

llamados así porque el dieléctrico se obtiene por electrólisis. En efecto: si se usa como *ánodo* una hoja de aluminio en una cuba electrolítica que contiene una solución de borato de aluminio, el ánodo se recubre de una capa aislante invisible de, probablemente, óxido de aluminio. El aluminio y la solución forman las armaduras de un condensador, y el dieléctrico es la capa de óxido de aluminio. Como la distancia entre las armaduras es pequeñísima, la capacidad es muy grande. Se obtienen así condensadores con varios μF de capacidad por dm^2.

También se usan condensadores variables, como el de la figura: al girar las chapas móviles frente a las fijas, varía la capacidad del conjunto (que es una batería de condensadores).

Energía de un condensador

Cualquier aparato intercalado en un circuito consume, en el tiempo t, una energía

$$W = V \cdot I \cdot t,$$

siendo V la tensión entre sus bornes.

¿Podemos aplicar esta misma fórmula al caso de un condensador? El problema es saber qué valor debemos adoptar para I en la fórmula. Porque ya hemos visto que un condensador recibe un *golpe de corriente*, por lo cual la I crece desde cero hasta un cierto valor, y vuelve a anularse, todo ello en un lapso brevísimo. La solución consiste en tomar el *valor medio* de las intensidades, que es $\frac{I}{2}$.

Entonces,

$$W = V \cdot \frac{I}{2} \cdot t$$

Pero $I \cdot t = q$, representa la carga adquirida por el condensador:

$$\boxed{W = \frac{1}{2} q \cdot V}$$

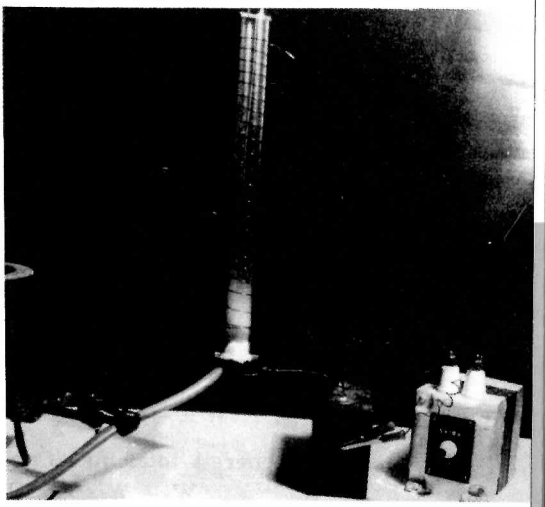
donde obtenemos W en joules, pues q está medida en coulombs y V, en volts.

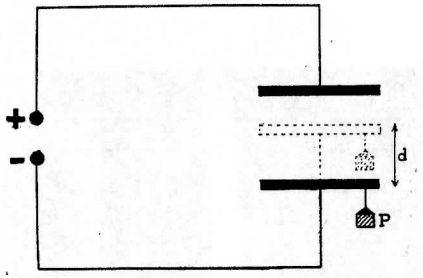
También podemos expresar esta energía empleando la capacidad $C = q/V$.

$$\boxed{W = \frac{1}{2} C \cdot V^2}$$

¿Qué ocurre con esta energía, recibida por el condensador? Puede manifestarse de muchas maneras: al unir las placas y producir-

Precipitador de Cottrell. Un cilindro hueco (chimenea) tiene un cable a lo largo de su eje. Una d.d.p. entre el cilindro y el cable hace que las partículas de humo se depositen sobre ellos, y al exterior sale menor cantidad. Se emplea con éxito en zonas afectadas por la densidad del humo de fábricas. Arriba): Sin conectar. Abajo): Conectado.





se la corriente de descarga; al hacer saltar una chispa entre ambas placas. Si se realiza el dispositivo de la figura, esa energía eléctrica se puede transformar en energía mecánica: la placa negativa es móvil, y la positiva, fija; por acción de la fuerza de atracción, la chapa inferior sube, y la pesa P realiza el trabajo $P \cdot d$.

EJEMPLOS: *Un condensador de 0,01 μ F se carga con 200 V. Calcular la energía adquirida por el condensador.*

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} 0{,}01\ \mu F \cdot (200\ V)^2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}01 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^4\ F\ V^2 =$$

$$= 2 \cdot 10^{-4}\ (F \cdot V^2) = 2 \cdot 10^{-4}\ J$$

La diferencia de potencial entre las placas de un condensador de 2 μ F es 400 V; y entre las de otro de 1 μ F, 300 V. Se los conecta en paralelo. Calcular:

a) La energía inicial de cada condensador;

b) La carga y tensión en cada condensador después de haber sido conectados en paralelo;

c) La energía del sistema de los dos condensadores puestos en paralelo.

La carga del condensador de capacidad $C_1 = 2\ \mu F$ es:

$$q_1 = 2\ \mu F \cdot 400\ V = 8 \cdot 10^{-4}\ C,$$

y la del otro condensador,

$$q_2 = 1\ \mu F \cdot 300\ V = 3 \cdot 10^{-4}\ C$$

Las energías correspondientes son:

$$W_1 = \frac{1}{2} q_1 V_1 = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 10^{-4}\ C \cdot 400\ V = 16 \cdot 10^{-2}\ J$$

$$W_2 = \frac{1}{2} q_2 V_2 = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^{-4}\ C \cdot 300\ V = 4{,}5 \cdot 10^{-2}\ J$$

Al conectar en paralelo, la capacidad total vale:

$$C = C_1 + C_2 = 2\ \mu F + 1\ \mu F = 3\ \mu F$$

La carga total es la suma de q_1 y q_2:

$$q = q_1 + q_2 = 8 \cdot 10^{-4}\ C + 3 \cdot 10^{-4}\ C = 11 \cdot 10^{-4}\ C$$

Por lo tanto, la tensión vale:

$$V = \frac{q}{C} = \frac{11 \cdot 10^{-4}\ C}{3\ \mu F} = \frac{11 \cdot 10^{-4}\ C}{3 \cdot 10^{-6}\ F} = \frac{11}{3} \cdot 10^2\ V$$

Luego, la energía del sistema:

$$W = \frac{1}{2} q V = \frac{1}{2} 11 \cdot 10^{-4}\ C \cdot \frac{11}{3} \cdot 10^2\ V = 20{,}1 \cdot 10^{-2}\ J$$

La energía total inicial valía:

$$W_1 + W_2 = 16 \cdot 10^{-2} + 4{,}5 \cdot 10^{-2}\ J = 20{,}5 \cdot 10^{-2}\ J$$

De modo que hay una diferencia entre las energías final e inicial de $0{,}4 \cdot 10^{-2}$ J. ¿Qué pasó con esa energía? Al conectar las placas de los condensadores hubo una redistribución de las cargas, y, como consecuencia, pasaron cargas por el alambre de conexión; esas cargas desprendieron calor, por valor de $0{,}4 \cdot 10^{-2}$ J.

Fuerza en un campo eléctrico

La existencia de un campo eléctrico se revela por las fuerzas que actúan sobre cargas eléctricas colocadas en él. Para hallar la relación entre esas fuerzas y la intensidad del campo se usa el dispositivo de la figura, llamado *balanza electrostática*. Entre las placas A y C de un condensador se establece una diferencia de potencial elevada (algunos miles de volts); al dar a m, mediante el contacto l, una cierta carga negativa q, la armadura A atrae a m, y la C la rechaza; la balanza, por lo tanto, se desequilibra. Para restablecer el equilibrio se colocan pesas en el otro platillo, P, que de esta manera miden la fuerza F con que el campo ha actuado sobre la carga. Colocando distintas cargas, q_1, q_2, q_3, actúan distintas fuerzas: F_1, F_2, F_3. Comprobaremos, en todos los casos, que el cociente entre cada fuerza y la respectiva carga es constante. O sea:

$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3}$$

Pero ese cociente no sólo es constante, sino también igual a la intensidad del campo entre las placas del condensador. Es decir,

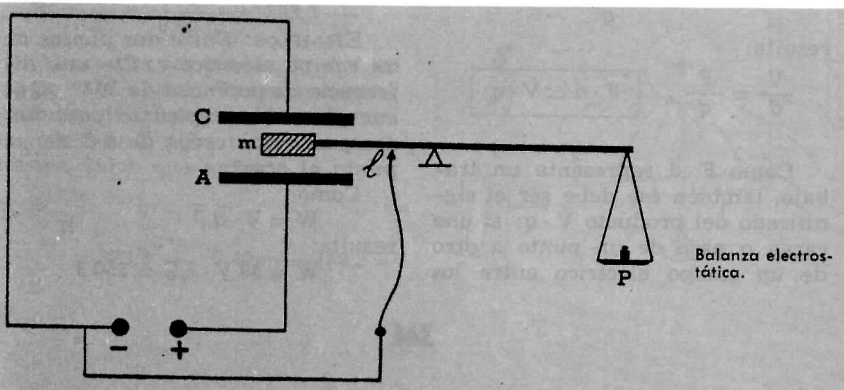
$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3} = E$$

En general, pues,

$$\frac{F}{q} = E \therefore \boxed{F = E\,q}$$

La intensidad de campo en un punto

Se puede definir como el cociente entre la fuerza F y la carga q colocada en ese punto. Ahora quizá comprendamos mejor por qué hemos dicho anteriormente que E es una magnitud vectorial: su sentido y dirección son los de la fuerza F. Conviene aquí comparar esta definición con la que hemos dado para la intensidad H de un campo magnético, apreciando así la estrecha analogía entre ambos.



Balanza electrostática.

EJEMPLOS: *Sobre una carga eléctrica de 10 C colocada en un campo eléctrico actúa una fuerza de atracción de 10 N. Calcular la intensidad de campo en ese punto.*

$$E = \frac{F}{q} = \frac{10\ N}{10\ C} = 1\ \frac{N}{C}$$

Sobre una carga eléctrica situada en un campo eléctrico cuya intensidad vale $E = 5\ \frac{N}{C}$ *actúa una fuerza* $F = 100\ \vec{g}$. *¿Cuánto vale la carga eléctrica?*

$$E = \frac{F}{q} \therefore\ q = \frac{F}{E}$$

$$F = 100\ \vec{g} = 100 \cdot 980\ \text{dyn} = 98\,000\ \text{dyn} = 0{,}98\ N$$

Luego:

$$q = \frac{0{,}98\ N}{5\ N/C} = 0{,}196\ C \cong 0{,}2\ C$$

UNA CONSECUENCIA IMPORTANTE. Si recordamos que la intensidad de campo eléctrico está relacionada con la diferencia de potencial V y la distancia d, por la fórmula

$$E = \frac{V}{d}$$

y, como terminamos de ver,

$$E = \frac{F}{q}$$

resulta:

$$\frac{V}{d} = \frac{F}{q} \therefore\ \boxed{F \cdot d = V \cdot q}$$

Como $F \cdot d$ representa un trabajo, también ése debe ser el significado del producto $V \cdot q$: si una carga q pasa de un punto a otro de un campo eléctrico entre los cuales existe una diferencia de potencial V, el trabajo eléctrico realizado vale:

$$W = V \cdot q$$

Si el campo es creado por una carga positiva, y q es también positiva, el trabajo W deberá realizarlo el que mueva la carga de un punto al otro yendo contra la fuerza de repulsión entre ellas; si en cambio q es negativa, el trabajo lo realiza el mismo campo eléctrico, puesto que la fuerza entre ambas cargas es ahora de atracción.

Podemos entonces recordar nuevamente lo que dijimos en el capítulo 15: *la diferencia de potencial entre dos puntos es igual a la energía empleada por un coulomb cuando pasa de uno de esos puntos al otro.* Los ejercicios que siguen aclararán este concepto tan importante.

Hay algo más: en los problemas anteriores hemos medido la intensidad de campo en N/C. Podemos ahora encontrar la relación entre esta unidad y el V/m, que hemos empleado antes:

Como

$$\frac{V}{d} = \frac{F}{q}$$

resulta:

$$1\ \frac{V}{m} = 1\ \frac{N}{C}$$ (todas son unidades del sistema M.K.S.)

EJEMPLOS: *Entre dos puntos de un campo eléctrico existe una diferencia de potencial de 30 V. ¿Qué energía debe emplearse para hacer pasar una carga de 5 C de un punto al otro?*

Como

$$W = V \cdot q,$$

resulta:

$$W = 30\ V \cdot 5\ C = 150\ J$$

La distancia entre los dos puntos del problema anterior es de 30 cm. ¿Qué fuerza media actuó sobre la carga durante su movimiento?

$$W = F \cdot d$$

$$\therefore F = \frac{W}{d} = \frac{150\ J}{0{,}30\ m} = 500\ N$$

¿Por qué decimos "fuerza media"?

La distancia entre las placas de un condensador plano mide 0,60 m. Se carga el condensador a 200 V, adquiriendo una carga de 10^{-3} C. Luego se mueve una de las placas, reduciendo la distancia entre ellas a 0,40 m.

Calcular:

a) La energía inicial del condensador;

b) La intensidad del campo eléctrico;

c) La energía final del condensador;

d) La fuerza que actuó sobre la placa durante el movimiento.

Como sabemos:

$$W_1 = \frac{1}{2} q V =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 10^{-3}\ C \cdot 200\ V = 0{,}1\ J$$

La intensidad E del campo vale:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{200\ V}{0{,}60\ m} = 333{,}3\ \frac{V}{m}$$

Al acercar las placas, la *d. d. p.* ya no vale V, sino V', que podemos calcular fácilmente teniendo en cuenta que E debe tener ahora el mismo valor que antes:

$$E = \frac{V'}{d'} \therefore V' = E\, d' =$$

$$= 333{,}3\ \frac{V}{m} \cdot 0{,}40\ m = 133{,}3\ V$$

Por lo tanto,

$$W_2 = \frac{1}{2} q V' =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 10^{-3}\ C \cdot 133{,}3\ V = 0{,}0667\ J$$

La diferencia entre W_1 y W_2 da la energía gastada al mover la placa, que llamamos ΔW.

$$\Delta W = 0{,}066\ J - 0{,}1\ J = -0{,}033\ J$$

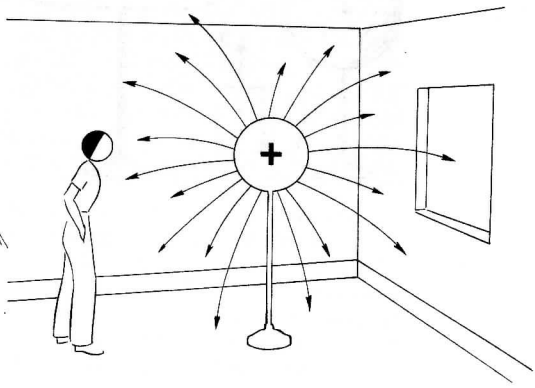
(¿Qué significa el signo menos?)

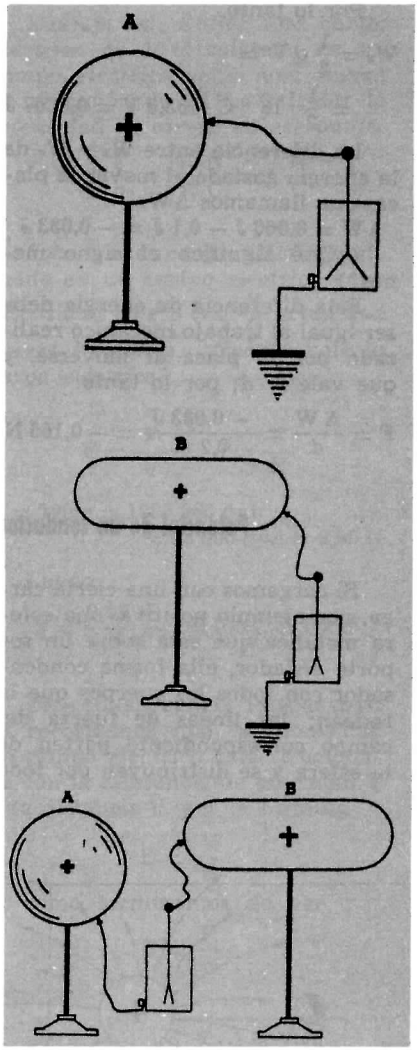
Esta diferencia de energía debe ser igual al trabajo mecánico realizado por la placa al moverse, y que vale $F \cdot d$; por lo tanto:

$$F = \frac{\Delta W}{d} = \frac{-0{,}033\ J}{0{,}2\ m} = -0{,}165\ N$$

Potencial de un conductor

Si cargamos con una cierta carga, por ejemplo positiva, una esfera metálica que está sobre un soporte aislador, ella forma condensador con todos los cuerpos que la rodean: las líneas de fuerza del campo correspondiente parten de la esfera y se distribuyen por todo





el conjunto de cuerpos que están a su alrededor. Para simplificar el estudio de este condensador, supongamos que en la habitación sólo está la esfera; por lo tanto, las paredes de la habitación forman la otra "placa" del condensador, y el campo tiene la configuración de la figura. Podemos aún simplificar más la forma de expresarnos: las paredes de la habitación están unidas a tierra, por lo cual podemos decir que nuestro condensador está formado por la esfera y tierra.

La tensión entre las placas de este condensador original se mide como antes: conectando un electrómetro de Wulf entre la esfera y tierra. Supongamos que esa tensión sea de 50 V. Carguemos ahora otro cuerpo cualquiera –que también supondremos sólo en la habitación–, y midamos su diferencia de potencial con tierra: supongamos que sea de 30 V.

Por último midamos la diferencia de potencial entre los dos cuerpos: observaremos que el electrómetro indica 20 V.

Pero justamente 20 V es la diferencia entre las diferencias de potencial de cada cuerpo y tierra. Esto nos hace recordar que en la medición de alturas ocurre algo similar: Buenos Aires está a 17 m sobre el nivel del mar; Córdoba está a 417 m sobre el nivel del mar; en consecuencia, la diferencia de alturas entre Córdoba y Buenos Aires es de 400 m, que es justamente la diferencia entre las respectivas diferencias de altura de cada ciudad y el nivel del mar.

Así como para las mediciones de alturas se ha convenido en asignar altura cero al nivel del mar, para las medidas de potenciales se ha convenido en asignar a la tierra potencial cero. De ahora en adelante, en lugar de decir que la diferencia de potencial entre un cuerpo y la tierra es de 50 V, diremos, abreviadamente: *el potencial de ese cuerpo vale 50 V.*

Obsérvese cómo se simplifica el resultado anterior; en lugar de decir: "la diferencia de potencial entre ambas esferas es igual a la diferencia entre las diferencias de potencial entre cada esfera y tierra", diremos "la diferencia de potencial entre ambas esferas es igual a la diferencia de sus potenciales".

Hay algo más: en la experiencia anterior podría ocurrir que al unir los dos cuerpos mediante el electrómetro, éste indicara 80 V, en lugar de 20 V. ¿Cómo interpretamos este hecho? La comparación entre niveles vuelve a ayudarnos: si calculamos la diferencia de niveles entre Córdoba y el Mar Muerto, hallaremos como valor 537 m, pues el Mar Muerto está 120 m por *debajo* del nivel del mar, o sea: tiene nivel — 120 m. Por lo tanto, 417 m — (— 120 m) = 417 + 120 m = 537 m. De la misma manera decimos que el segundo cuerpo tenía un potencial negativo de — 30 V, por lo que la diferencia de potencial entre ambos vale ahora:

$$50\,V - (-30\,V) = 50\,V + 30\,V = 80\,V.$$

De acuerdo con todo esto, ¿qué significará decir que un conductor tiene un potencial de 1 V? Que su diferencia de potencial con tierra es de 1 V, y por lo tanto, que el trabajo eléctrico gastado por 1 C para pasar desde ese cuerpo a tierra es de 1 J.

Todo esto podemos trasladarlo al caso de un circuito, donde siempre hemos hablado de diferencia de potencial entre puntos. Ahora podemos decir cuánto vale el *potencial de un punto* del circuito: su diferencia con tierra. Para medirlo procedemos como antes: a través del electrómetro unimos dicho punto con tierra (estando el circuito cerrado, por supuesto). La medida del electrómetro da el potencial del punto.

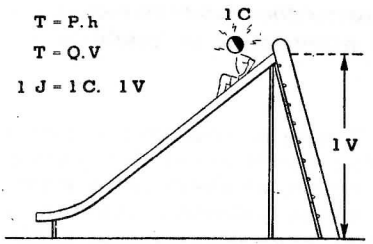
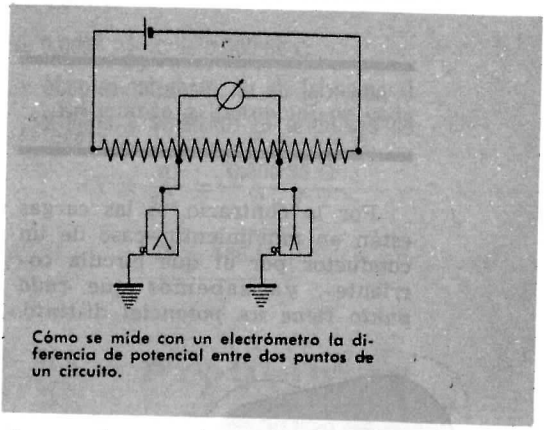


Imagen de una diferencia de potencial de 1 V.


Cómo se mide con un electrómetro la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.

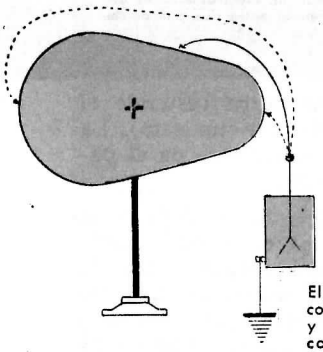
OBSERVACIÓN. Al atribuir a la tierra potencial cero, no significa que no esté cargada. Por lo contrario, experiencias que no podemos describir aquí prueban que tiene una carga negativa de 600 000 C; las cargas positivas inducidas correspondientes se encuentran posiblemente localizadas en los infinitos corpúsculos que se encuentran en suspensión en la atmósfera terrestre. Como consecuencia, la Tierra está rodeada de un campo eléctrico que vale aproximadamente 100 V/m.

Característica fundamental del potencial de un conductor

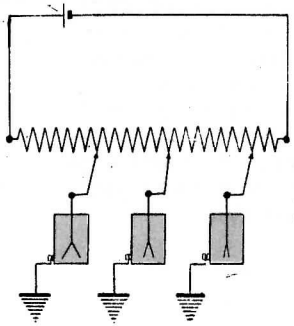
Cuando un conductor está cargado y sus cargas eléctricas están en reposo, el electrómetro indica el mismo potencial, cualquiera sea el punto del conductor donde toquemos, inclusive los puntos interiores. Por esto

El potencial de un conductor cargado y en equilibrio es constante y uniforme.

Por lo contrario, si las cargas están en movimiento –caso de un conductor por el que circula corriente–, ya sabemos que *cada punto tiene un potencial distinto.*



El potencial de un conductor cargado y en equilibrio es constante y uniforme.



El potencial cae a lo largo de un conductor por el que circula corriente.

Capacidad de un conductor

Así como hemos llamado potencial de un conductor a la diferencia de potencial del condensador conductor-tierra, podemos también definir como capacidad de ese conductor a la capacidad del mismo condensador.

Por lo tanto, diremos que un conductor tiene una capacidad C si al suministrársele una carga q alcanza un potencial V tal que:

$$C = \frac{q}{V}$$

Por ejemplo: decir que la capacidad de un conductor, aislado de otros cuerpos, vale 1 μ F, significa que si le suministramos una carga de 0,002 C, por ejemplo, el potencial que adquiere el cuerpo es:

$$V = \frac{q}{C} = \frac{0{,}002\ C}{10^{-6}\ F} =$$

$$= 0{,}002 \cdot 10^{6}\ V = 2\,000\ V$$

El concepto de capacidad de un solo conductor resulta muy útil para resolver problemas como el siguiente:

Una esfera de 2 μ F de capacidad recibe una carga de 0,001 C. Se la pone luego en breve contacto con otra esfera de 4 μ F, y se las separa. Se desea saber la carga y el potencial final de cada esfera.

Calculemos el potencial de la primera esfera antes del contacto:

$$V_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{0{,}001\ C}{2\ \mu F} =$$

$$= \frac{0{,}001\ C}{2 \cdot 10^{-6}\ F} = \frac{0{,}001 \cdot 10^{6}}{2} = 500\ V$$

Al poner en contacto ambas esferas, pasa carga de la esfera cargada a la descargada, hasta que los potenciales de ambos se equilibran. Llamando V al potencial final del equilibrio –el mismo para cada esfera– y q_1 y q_2 a las cargas de cada esfera después del contacto, resulta:

$$\left.\begin{aligned} V &= \frac{q_1}{C_1} \\ V &= \frac{q_2}{C_2} \end{aligned}\right\} \frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2} \qquad \therefore \frac{q_1 + q_2}{q_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_2}$$

$$\therefore q_2 = (q_1 + q_2)\,\frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$q = q_1 + q_2 = 0{,}001 \text{ C}$$

$$q_2 = 0{,}001 \text{ C} \cdot \frac{4\,\mu\text{F}}{2\,\mu\text{F} + 4\,\mu\text{F}} = 0{,}001 \cdot \frac{4}{6} \text{ C} = 0{,}000\,66 \text{ C}$$

$$\boxed{q_2 = 0{,}000\,66 \text{ C}}$$

Por lo tanto,

$$q_1 = q - q_2 = 0{,}001 \text{ C} - 0{,}000\,66 \text{ C}$$

$$\boxed{q_1 = 0{,}000\,33 \text{ C}}$$

En cuanto al potencial de cada esfera:

$$V = \frac{q_1}{C_1} = \frac{0{,}000\,33 \text{ C}}{2\,\mu\text{F}}$$

$$\boxed{V = 166 \text{ V}}$$

Problemas

1. Calcular la intensidad del campo eléctrico entre las placas de un condensador cuya tensión es de 200 V, sabiendo que la distancia entre placas es de 4 mm.

R.: 50 000 V/m

2. En el condensador anterior, ¿cuál es la diferencia de potencial entre una de las placas y un punto situado a mitad de distancia entre las placas?

R.: 100 V

3. ¿Cuánto vale la intensidad de campo en el condensador anterior si la distancia entre placas se aumenta a 10 mm? ¿Cuánto vale ahora la diferencia de potencial entre las placas? (Se supone que el condensador no está conectado a la fuente.)

R.: 50 000 V/m; 500 V

4. La capacidad de un condensador vale 2 μ F — ¿Qué carga adquiere si se lo conecta a una diferencia de potencial de 220 V?

R.: $4{,}4 \cdot 10^{-4}$ C

5. La distancia entre las placas de un condensador plano es de 2 cm; su capacidad vale 0,1 μ F — ¿Cuánto vale la intensidad del campo cuando se lo carga con $8 \cdot 10^{-6}$ C?

R.: $4 \cdot 10^{3}$ V/m

6. ¿Para qué distancia entre las placas del condensador anterior, la intensidad del campo se duplica?

R.: 1 cm

7. Un condensador de un microfaradio está cargado al potencial de 300 V. Se reúnen sus armaduras con un hilo de lino, y después de 10 segundos el potencial ha descendido a 220 V. ¿Cuál ha sido la intensidad media de la corriente de descarga? ¿Cuál es, aproximadamente, la resistencia eléctrica del hilo?

R.: 0,000 008 A; $32{,}5 \cdot 10^6\ \Omega$

8. Un condensador de un microfaradio se carga al potencial de 3 000 V. ¿Qué cantidad de calor producirá la chispa de descarga?

R.: 1,07 cal

9. ¿Qué capacidad, en microfaradios, debiera tener un condensador para que cargado al potencial de 6 000 V fuera capaz de accionar un motor de 0,1 HP durante 1 segundo?

R.: $4{,}087\ \mu F$

10. Calcular la capacidad de un condensador plano cuyas placas miden 5 000 cm^2, si la distancia entre ellas es de 5 mm.

R.: $8{,}85 \cdot 10^{-9}$ F

11. En el condensador anterior se interpola, como dieléctrico, una lámina de vidrio. ¿Cuánto vale ahora la capacidad del condensador?

R.: $4{,}86 \cdot 10^{-8}$ F

12. Dos condensadores están acoplados en serie cuando la placa positiva de uno está unida a la negativa del otro. Los dos condensadores adquieren, pues, la misma carga. Demostrar que si se reemplazan los dos condensadores por uno solo, la capacidad de éste debe ser tal que su recíproca sea igual a la suma de las recíprocas de las capacidades de los dos. Es decir

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

13. Dos condensadores están acoplados en paralelo cuando sus dos placas positivas están unidas a un mismo borne, y las negativas a otro. Los dos condensadores adquieren, pues, la misma tensión. Demostrar que si se reemplazan los dos condensadores por uno solo, la capacidad de éste deberá ser igual a la suma de las capacidades de los otros dos. O sea:

$$C = C_1 + C_2$$

14. La distancia entre las placas de un condensador plano mide 1 cm. El espacio entre ellas está ocupado por un aislador de constante dieléctrica 5. El área de cada placa mide 2 000 cm^2. Calcular la diferencia de potencial entre las placas cuando se carga el condensador con una carga de $6{,}66 \cdot 10^{-8}$ C. ¿Cuánto vale esa diferencia de potencial si se retira el dieléctrico? Calcular la energía del condensador en ambos casos. ¿Cómo se explica la diferencia entre esos dos valores?

R.: 75 V; 375 V; 25 erg; 126 erg

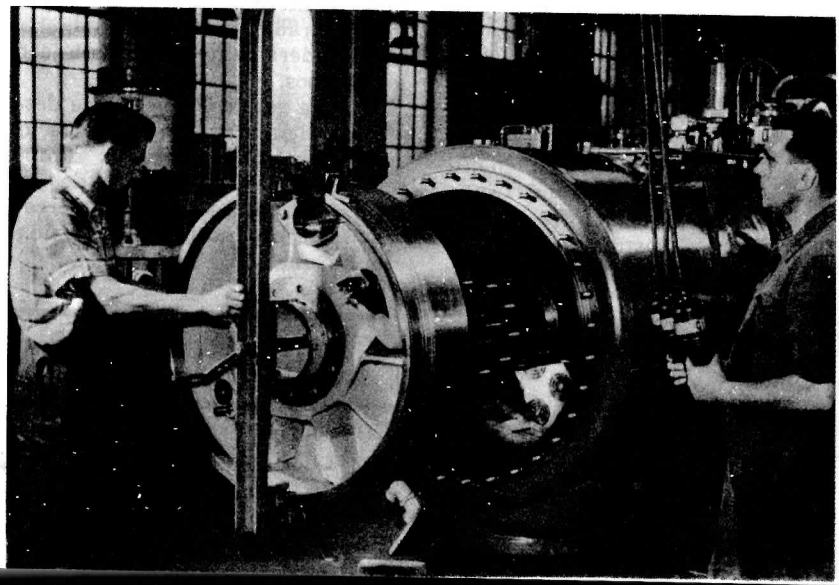
23 INTERACCIÓN ENTRE LOS CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

Campos magnéticos creados por corrientes

La corriente eléctrica produce efectos magnéticos, y este efecto lo hemos utilizado para transformar, por ejemplo, una aguja de tejer en un imán artificial.

La historia de este descubrimiento es muy interesante. Desde la época de Tales de Mileto, los físicos querían saber de qué modo una carga eléctrica influye sobre una aguja magnética; suponían que, por sus muchas semejanzas, la electricidad y el magnetismo, estaban vinculados: hay dos clases de polos magnéticos y hay dos clases de electricidad; los polos magnéticos del mismo nombre se rechazan, y los de distinto nombre, se atraen; las cargas eléctricas del

El operario de la derecha maneja los comandos de un guinche eléctrico. (Foto Dr. Wolff y Trietscher.)



Hans Christian Oersted (1777-1851).

mismo nombre también se rechazan, y las de distinto nombre también se atraen, etc. Se había observado, además, que los rayos, que son descargas eléctricas, perturban las brújulas.

En 1774, la Academia de Bavaria realizó una encuesta sobre "la identidad de las dos fuerzas misteriosas, electricidad y magnetismo". Las respuestas llenaron trece grandes volúmenes, y el fallo de la academia fue: "Aunque para algunos experimentadores la electricidad y el magnetismo son en algunos aspectos una misma cosa, en otros son tan diferentes que hacen necesario que se los considere distintos".

En 1800 Volta inventó la pila; los experimentadores contaron, desde entonces, con una fuente de corriente eléctrica constante. Veinte años después –julio de 1820–, Hans Christian Oersted, danés, en una memoria de sólo seis páginas, titulada *"Experimente circa efficaciam conflictus electrici in acum magneticam"*, solucionaba el enigma: *toda corriente eléctrica crea un campo magnético.*

Oersted nació en 1777 en Rudkjobing, isla de Langeland, Dinamarca. Estudió en Copenhague, y a los 23 años fue nombrado profesor de medicina del Instituto Politécnico. Vivió una vida tranquila, de trabajo y estudio.

Acerca de este importante descubrimiento, se ha dicho muchas veces que fue obra de la casualidad. Pero en ciencia, la palabra casualidad no tiene estrictamente el mismo significado que en la vida diaria. Oersted hacía quince años que buscaba esa relación, y por eso puede decirse de él lo que Lagrange dijo de Newton en cierta oportunidad: "Esos accidentes sólo ocurren a quienes los provocan".

Campo eléctrico y campo magnético

¿Cómo traducimos en lenguaje de campo el resultado de la experiencia de Oersted? Esta pregunta tiene gran importancia, pues, como reiteradas veces hemos dicho, lo verdaderamente importante son los campos.

Si una aguja magnética se desvía en alguna región del espacio, en esa región existe un campo magnético. Como cerca de un conductor por el que circula corriente se produce una desviación, resulta que:

Toda corriente eléctrica crea un campo magnético

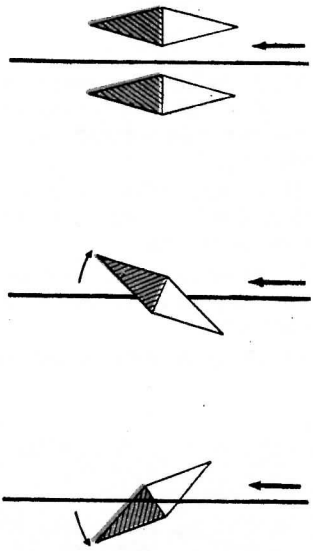
Si cerca de una aguja magnética colocamos una carga eléctrica en reposo, un conductor cargado, por ejemplo, la aguja permanece inmóvil.

Una carga eléctrica en movimiento crea un campo magnético.

Como una corriente eléctrica no es más que una sucesión de cargas en movimiento, podemos decir que:

Una carga eléctrica en reposo no crea campo magnético.

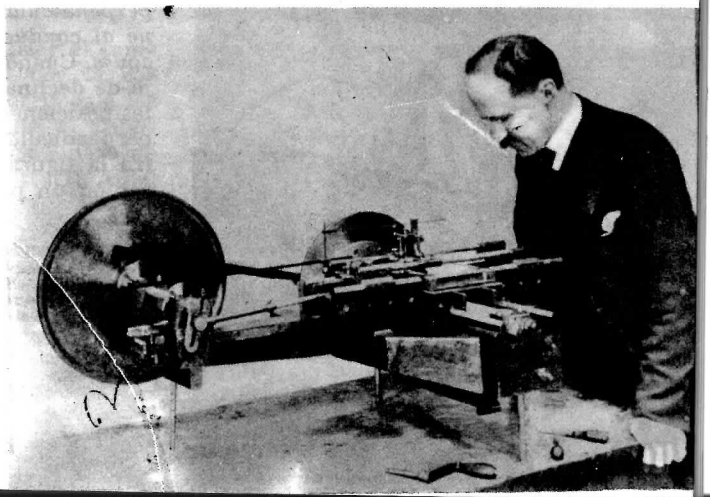
Desde ahora llamaremos *efecto Oersted* a este fenómeno. Por lo tanto, desplazando una carga eléctrica sola, sin crear una verdadera corriente eléctrica, podemos producir un campo magnético. Tal fue lo que realizó Rowland, con la sencilla maquinita que muestra la figura: el disco central lleva una carga eléctrica suministrada por una máquina electrostática, y al hacerlo girar velozmente se produce un campo magnético, que Rowland midió con mucha precisión.



Toda corriente eléctrica crea un campo magnético a su alrededor.

Campo magnético de una corriente rectilínea

¿Cómo es el campo magnético creado por una corriente? Si el conductor es rectilíneo, utilizando una aguja magnética que se mueva en un plano horizontal podemos observar lo siguiente:



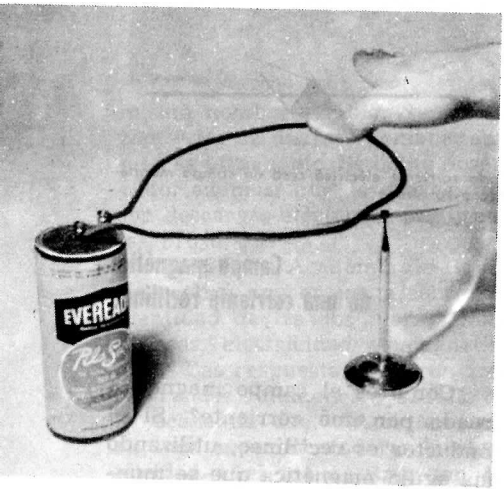
Henry A. Rowland ante su máquina.

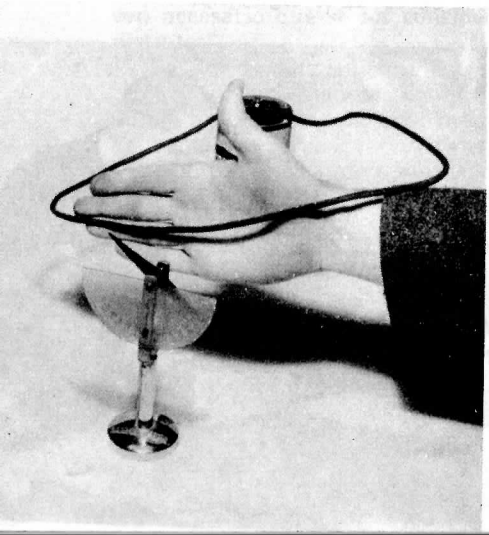
1) Si la aguja se coloca *a ambos lados* del conductor, *no se desvía* por más intensa que sea la corriente.

2) Si se la coloca *sobre* el conductor, el polo *se mueve* en el sentido de la flecha.

3) Si se la coloca *bajo* el conductor, el polo se mueve en sentido contrario.

4) Si se invierte el sentido de la corriente, se invierte también el sentido del movimiento de la aguja.





Puesta la mano derecha sobre el conductor, de modo que las puntas de los dedos señalen el sentido de la corriente, y el conductor sobre la aguja magnética, el polo norte se desvía hacia donde señala el pulgar.

Regla de Ampère

Ampère dedujo de estas experiencias una regla muy útil para saber hacia dónde se mueve el polo N. Se coloca la mano derecha sobre el conductor, y éste sobre la aguja, de modo que la palma mire hacia la aguja y que la corriente entre por la muñeca y salga por la punta de los dedos: *el pulgar extendido indica hacia dónde se mueve el polo N.*

Repitamos ahora las experiencias pero usando una *aguja de inclinación* es decir, que se mueve en un plano vertical:

1) Si la aguja se coloca *sobre* o *bajo* el conductor, *no se mueve.*

2) Si se la coloca *a la derecha,* el polo N *se mueve* como indica la flecha.

3) Si se la coloca *a la izquierda,* el polo N *se mueve* en sentido contrario.

4) Si se invierte el sentido de la corriente, se invierte también el sentido del movimiento del polo N.

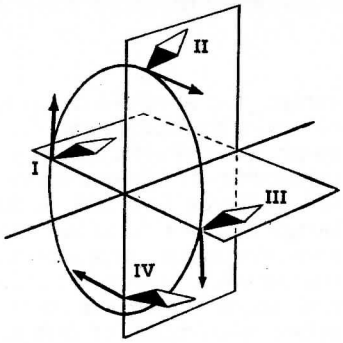
Estas experiencias indican que el *vector campo magnético H es perpendicular al plano que contiene al conductor y al centro de la aguja.* Cuando colocamos una aguja de declinación en la primera de las posiciones indicadas, como H es perpendicular al plano que muestra la figura, la aguja debería girar en un plano vertical, pero no

puede hacerlo porque el tornillo que la sujeta sólo le permite girar en el plano horizontal. Por el contrario si en esa misma posición colocamos una aguja de inclinación, como puede girar en el plano vertical, *se moverá*.

Nos explicamos ahora la sorpresa de Oersted, pues jamás imaginó que la fuerza que la corriente provoca sobre la aguja fuera *transversal*. Oersted creía que entre el conductor y la aguja debía existir una fuerza de atracción, *del mismo tipo* de la *fuerza gravitatoria de Newton* y de *la fuerza magnética de Coulomb*; es decir que sería una *fuerza de distancia*, que *actuaría según la recta imaginaria* que une a los cuerpos que se interaccionan. Con fuerzas de ese tipo, Newton había configurado una imagen del universo que fue aceptada y desarrollada con entusiasmo por todos los hombres de ciencia de la época. La experiencia de Oersted reveló la insuficiencia de esa concepción del universo y la necesidad de reemplazarla por otra más amplia. *Ésta ha sido*, sin duda, *la consecuencia más importante de la célebre experiencia de Oersted.*

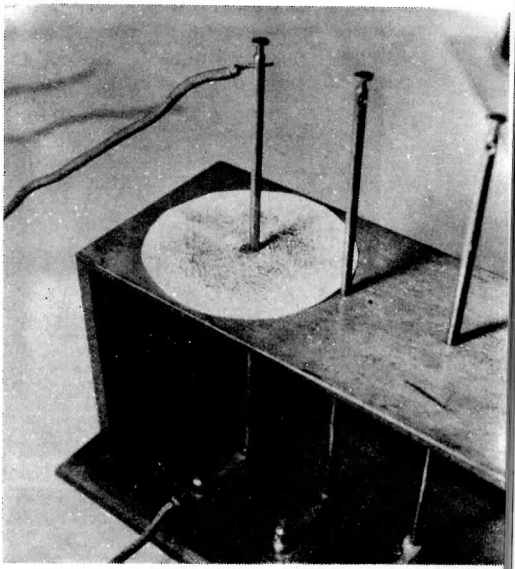
Espectro magnético del campo

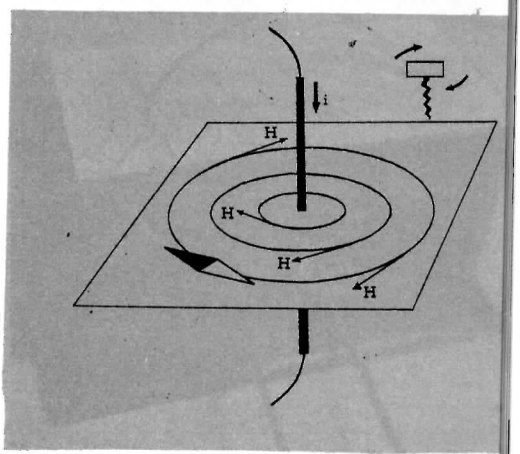
Si queremos visualizar el campo magnético creado por la corriente rectilínea, recurrimos a las limaduras de hierro que, al disponerse a lo largo de las líneas de fuerza, muestran la estructura del



El vector campo magnético H es perpendicular al plano determinado por el conductor y el centro de la aguja magnética.

Espectro de una corriente rectilínea.

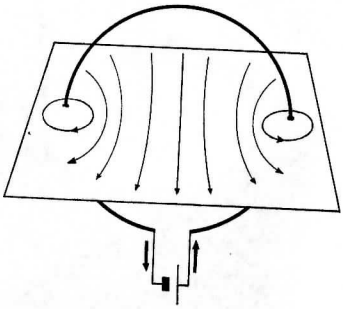




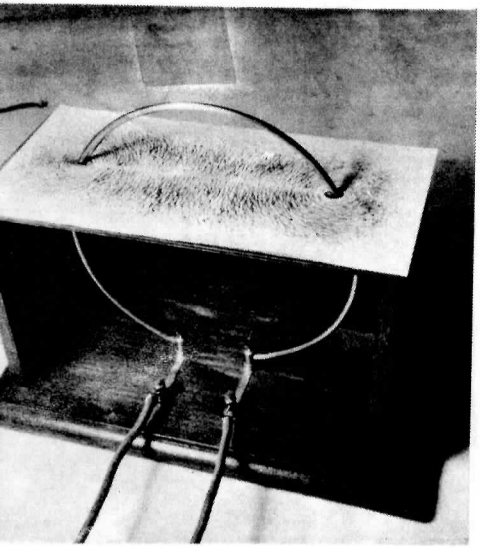
Las líneas de fuerza del campo de una corriente rectilínea son circunferencias concéntricas, cuyo centro común está en la intersección del conductor con el plano de las circunferencias.

campo. Por el centro de un cartón colocado horizontalmente se hace pasar un conductor recto y perpendicular al cartón; sobre éste se espolvorea limadura de hierro. Luego se hace circular durante unos segundos, una intensa corriente eléctrica por el conductor, y al mismo tiempo, con un dedo se golpea suavemente el cartón. Las limaduras forman entonces circunferencias concéntricas, que marcan las líneas de fuerza buscadas.

Para averiguar el sentido de las líneas de fuerza colocamos una brujulita sobre el cartón. Recordemos que las líneas de fuerza salen del polo norte y entran por el polo sur. Teniendo esto presente, y observando cómo se dispone la brújula al paso de la corriente, encontramos el sentido de la corriente, tal como se ve en la figura. Maxwell dio una regla llamada *del tirabuzón*, con la cual es siempre muy sencillo encontrar el sentido de las líneas de fuerza.



Campo de una corriente circular.



Regla del tirabuzón

El sentido de las líneas de fuerza es el mismo que el de rotación de un tirabuzón para que avance en el sentido de la corriente.

Una vez dibujadas las líneas, y recordando que $\vec{H}$ es tangente en cada punto a la línea que pasa por él y tiene su mismo sentido, es muy sencillo trazar dicho vector en todos los puntos que se nos ocurra. Volvemos a comprobar que es perpendicular al plano que contiene el conductor y la aguja.

Campo magnético de una corriente circular

Si damos al conductor la forma de una circunferencia y formamos el espectro magnético correspondiente, las líneas de fuerza adoptan la forma que se observa en la fotografía de la página anterior.

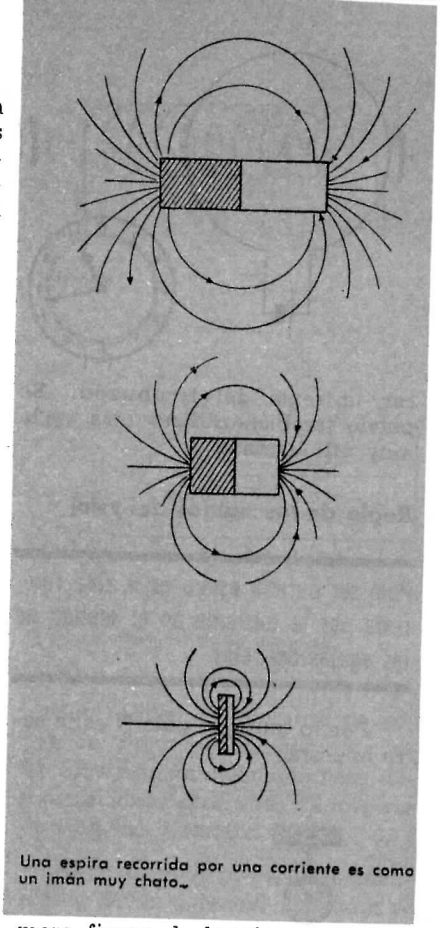
Para conocer su sentido aplicamos la regla del tirabuzón.

Comparemos este espectro con el de un imán en barra. Si vamos reduciendo éste cada vez más, hasta obtener una delgada hoja magnética, podemos comprobar que en ambos casos tenemos un espectro análogo: un conjunto de líneas que salen por una cara y entran por la otra.

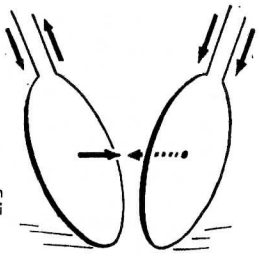
Desde el punto de vista del *espectro magnético, no existe ninguna diferencia entre una corriente circular y un imán.* Pero ¿no será esto sólo una analogía formal, sin ninguna significación verdaderamente profunda? La comprobación es sencilla: verificamos si las dos corrientes circulares se atraen o rechazan como dos imanes. En efecto así ocurre: si se disponen las cosas como indica la figura de pie de página, se observará cómo las dos espiras se atraen o se rechazan, según el sentido de la corriente.

Magnéticamente no hay diferencia entre una espira recorrida por una corriente y una delgada lámina magnética.

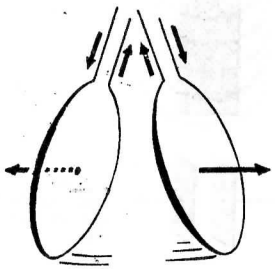
Si es cierto que a una espira podemos considerarla como un imán, ¿cuál es el polo N y cuál el polo S? Recordando que las líneas de fuerza entran por el polo S y salen por el polo N, podemos marcar los polos como indica la primera figura de la página siguiente, para lo cual debemos conocer el sentido de la corriente y apli-

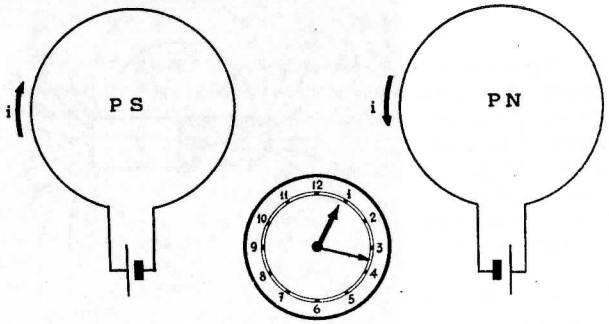


Una espira recorrida por una corriente es como un imán muy chato.



Las espiras se atraen o rechazan, como si fueran imanes.





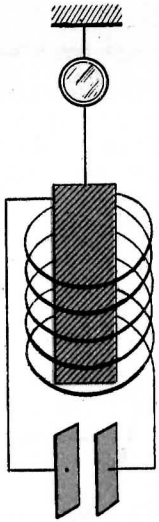
La regla de las agujas del reloj.

car la regla del tirabuzón. Se puede también utilizar otra regla muy útil llamada

Regla de las agujas del reloj

Polo sur de una espira es la cara recorrida por la corriente en el sentido de las agujas del reloj.

Por lo tanto, el polo N es la cara opuesta.



Esquema de la experiencia de Einstein y De Haas.

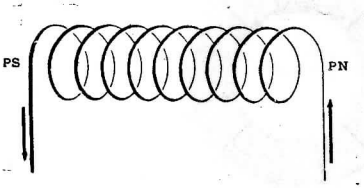
Los electrones, responsables del magnetismo

En el capítulo 14 hemos visto que es posible explicar muchos fenómenos magnéticos si se supone que en el interior de las sustancias existen imanes moleculares desordenados que, al ser ordenados por un campo magnético externo, hacen que el cuerpo se magnetice. Cuando se descubrió la existencia del electrón y se supo que giran en el seno de los átomos y describen órbitas parecidas a las de los planetas, no pasó mucho tiempo para que se formulara una hipótesis: como toda corriente circular se comporta como un imán, los imanes moleculares de que hemos hablado no serían otra cosa que los electrones al girar en sus órbitas, pues un electrón que gira alrededor de su núcleo es equivalente a una corriente circular (recuérdese la experiencia de Rowland).

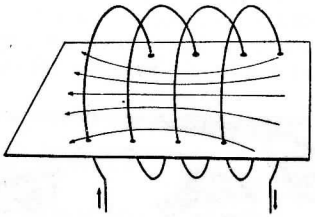
Cuando acercamos un imán a un trozo de hierro, ordenamos los circuitos electrónicos internos, de modo que todas las órbitas se orientan en un mismo sentido. El célebre físico Einstein tuvo la siguiente idea: si al colocar una barra en un campo magnético todos los electrones deben girar y orien-

tarse en determinada dirección, este efecto debe traducirse en una verdadera rotación de la barra. Einstein y De Haas realizaron la delicada experiencia, y el resultado confirmó notablemente la idea: el pequeño cilindro (10 cm de largo y 0,03 cm de diámetro), sujeto por un fino hilo de cuarzo, giró un cierto ángulo puesto de manifiesto por un espejito cuando por el solenoide pasó un golpe de corriente (descarga de un condensador).

También es posible comprobar el efecto inverso, debido a Barnett: si se hace girar un pequeño cilindro, se induce cierta cantidad de magnetismo en la barra, aunque no hay ningún campo magnético visible. Se ha conseguido orientar mecánicamente las órbitas electrónicas.



Solenoide.


El campo magnético de un solenoide.

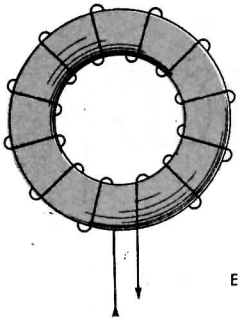
Campo magnético de un solenoide

Si hacemos una bobina (en física, se las llama solenoides), cada una de las espiras puede ser considerada como un pequeño imán: estos pequeños imanes se siguen unos a otros, y en conjunto componen un gran imán, con un polo N y un polo S. Para comprobarlo bastará suspender un solenoide frente a otro: ambos se atraen o rechazan, según el sentido de las corrientes, como si fueran dos verdaderos imanes.

¿Cómo conocer el polo magnético de un solenoide? Como las espiras se siguen una a otra, bastará averiguar, con la regla de las agujas del reloj, por ejemplo, cuál es el polo de la primera espira.

Con 4,50 m de alambre de cobre de 3 mm de espesor se puede construir un solenoide para demostraciones con unas 20 espiras de 6 cm de diámetro.

Si realizamos el espectro magnético de un solenoide, no sólo se comprueba la analogía entre imanes y solenoides (ambos espectros son idénticos), sino que sabremos también que el campo es mucho más intenso en el interior del solenoide –donde la densidad de líneas es mayor– que en el exterior. También observaremos que las líneas son prácticamente paralelas, lo que indica que el campo interior es uniforme. Probando con solenoides de diversas longitudes, se podrá observar que la uniformidad aumenta con la longitud del solenoide.



El solenoide toroidal.

Estos espectros nos sugieren una experiencia: ¿qué ocurre si cerramos el solenoide y formamos un anillo, o *solenoide toroidal*?

Las líneas de fuerza se cierran por completo por dentro del anillo, y *en el exterior, el campo desaparece*. Nótese la importancia de esta experiencia: por primera vez estamos ante un campo magnético completamente limitado.

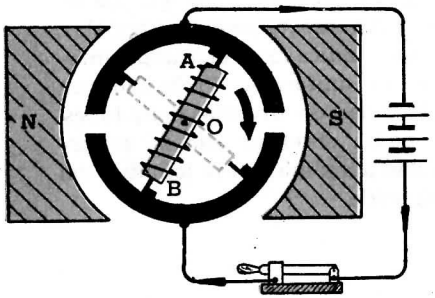
Principio del motor eléctrico

El fenómeno que hemos estudiado –todo solenoide recorrido por una corriente se comporta como un imán– ha permitido crear el motor eléctrico, la más importante de sus aplicaciones. *El motor eléctrico es un aparato que transforma energía eléctrica en energía mecánica.*

Aplicación del motor eléctrico a una pulidora de pintura.

Consideremos dos semianillos de cobre unidos a los polos de una batería, y una barra AB de hierro dulce envuelta por un solenoide, cuyos extremos hacen contacto en los semianillos. El anillo y la barra se hallan entre los polos de un imán. La barra puede girar alrededor de su centro O, sin perder contacto con los semianillos.

Esquema de la idea del motor.

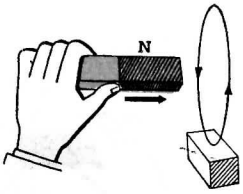


Al cerrar el circuito, la corriente pasa por el solenoide e imanta la barra. Si el arrollamiento se ha hecho de manera que en la posición de la figura aparezca un polo N en A, en B aparecerá un polo S. Como la barra está cerca del imán NS, éste la hará girar: el polo N del imán atrae al extremo B, y el S, al extremo A. La barra se mueve, y de esa manera el extremo A pasa al semianillo inferior, y el B al superior. Pero en ese momento se invierte el sentido de la corriente en el solenoi-

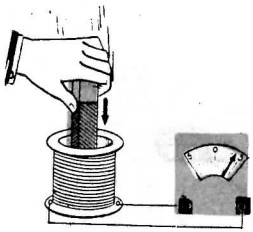
de, y lo que antes era polo N de la barra ahora es polo S, y el que era S es N.

Resulta así que ahora el polo N del imán rechaza al extremo B, y el S, al extremo A. Mientras circule la corriente, el movimiento de rotación de la barra continúa.

Si se cambia la conexión de los polos de la batería, la barra gira en sentido contrario.



Si se aleja o se acerca el imán a la espira, en ésta aparece una corriente eléctrica.



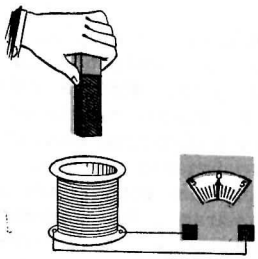
Al acercar el imán al solenoide, éste es recorrido por una corriente eléctrica en determinado sentido.

Corrientes eléctricas producidas por campos magnéticos

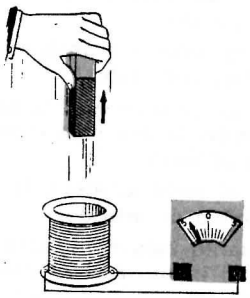
Después del descubrimiento del efecto Oersted, los hombres de ciencia se dedicaron a buscar el fenómeno inverso: *producir corriente eléctrica mediante campos magnéticos.* Faraday resolvió el problema, hacia 1830, para lo cual realizó una serie de experiencias, la más sencilla de las cuales está esquematizada en la primera figura de la derecha.

Al mover el imán, en el conductor circular se produce una corriente eléctrica, denominada *corriente inducida.*

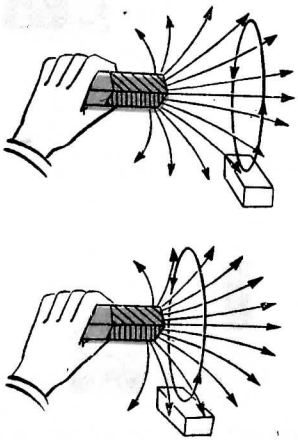
En la práctica, en vez de un conductor circular se usa un solenoide, con lo cual se multiplica el efecto; el único objeto del galvanoscopio es mostrar que, en efecto, pasa una corriente.



Si el imán está quieto, no hay corriente en el solenoide.



Al alejar el imán del solenoide, éste es recorrido por una corriente en sentido opuesto al de la corriente producida al acercar el imán.



La variación del flujo que atraviesa la bobina produce la corriente inducida.

Este fenómeno es muy curioso, si se tiene en cuenta que no se usan pilas, y ni siquiera existe contacto. El simple movimiento de un imán a distancia, hace aparecer una corriente eléctrica. Es lógico, pues, que estas experiencias apasionaran a los contemporáneos de Faraday y se discutiese acerca de su misterioso origen.

Con la instalación indicada se pueden realizar algunas interesantes observaciones:

1º) Si el imán se mantiene inmóvil, no hay corriente.

2º) Si el imán se acerca, aparece corriente, la que cesa cuando detenemos el imán.

3º) Si el imán se aleja, la corriente cambia de sentido.

4º) Cuanto más rápidamente se mueve el imán, más intensa es la corriente.

Podemos repetir esto con el lenguaje de campo. Coloquemos el imán: primero como muestra la primera figura superior de la izquierda; después, como en la segunda figura. Cuando acercamos el imán, la cantidad de líneas que entran en la espira es mayor. Podemos, pues, enunciar los resultados anteriores en otra forma:

1) Si el número de líneas que atraviesan a un solenoide no varía, no hay corriente inducida.

2) Si el número de líneas aumenta, hay corriente.

3) Si el número de líneas disminuye, hay una corriente de sentido contrario al anterior.

4) Cuanto más rápidamente varíe el número de líneas, más intensa será la corriente.

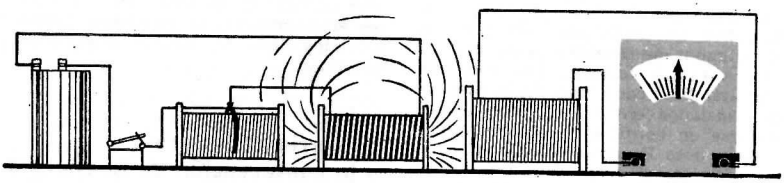
Inducción magnética producida por corrientes eléctricas

En vez de usar un imán para producir corrientes inducidas, podemos usar otro circuito eléctrico, puesto que toda corriente está acompañada de un campo magnético.

El solenoide de la figura (superior) conectado a una pila se denomina *primario* o *inductor*; el grande (inferior), *secundario* o *inducido*.

El solenoide primario se comporta como un imán, por lo cual podemos repetir las mismas experiencias que con el imán anterior; los resultados son los mismos: si el primario permanece inmóvil, no hay corriente en el secundario; si se acerca o se aleja, hay corriente.

Ahora podemos realizar algunas experiencias que con el imán resultaban imposibles. Aun fijan-



Instalación para producir una variación de flujo variando la intensidad de la corriente en el primario.

do la posición del primario, es posible hacer aparecer corrientes inducidas en el secundario, lo que se puede lograr de las siguientes maneras:

1) Cerrando la llave del primario.

2) Abriendo la llave.

3) Moviendo el reóstato.

¿Por qué también se obtienen corrientes inducidas con estos procedimientos?

1) Al cerrar la llave del primario comienza a circular una corriente que convierte al solenoide en un imán; como antes no había tal imán, debe haber aumentado el número de líneas de fuerza que pasan por el solenoide secundario, desde cero hasta cierto valor. Y ya sabemos que si aumenta el número de líneas que pasan por el circuito inducido, aparece una corriente de inducción.

2) Análogamente, si abrimos la llave y cortamos la corriente primaria, el número de líneas disminuye hasta cero y aparece una corriente inducida, de sentido contrario al anterior.

3) Finalmente, si por medio de un reóstato, se varía la intensidad de la corriente primaria, varía también el número de líneas de fuerza, y se produce una corriente inducida.

Inducción electromagnética

En resumen las experiencias anteriores prueban que, cualquiera sea la forma de producir el campo magnético,

Todo campo magnético variable crea una corriente eléctrica.

En adelante llamaremos *"efecto Faraday"* a esta importante conclusión, que resume una gran cantidad de fenómenos, muy distintos en su forma y apariencia, pero iguales en su fondo.

La historia del efecto Faraday

El experimento de Oersted demostró claramente que era posible "producir magnetismo por medio de la electricidad". Faraday pensó inmediatamente que la inversa debía ser también posible. Y así, en su libreta de notas, en 1822 escribió: "Convertir magnetismo en electricidad". Sus primeros intentos fracasaron. En 1825, por ejemplo, rodeó un imán con un alambre en espiral, esperando que la corriente podría producirse si aumentaba suficientemente la potencia del imán. En el verano de 1831, Faraday atacó el problema por quinta vez. En lugar de colocar un imán permanente dentro de un solenoi-

de, arrolló dos alambres de cobre, A y B, sobre un anillo de hierro dulce, de 6 pulgadas de diámetro externo. La bobina A estaba formada por tres trozos de alambre, cada uno de 24 pies de largo, "aislados entre sí y que podían conectarse en conjunto o separadamente". La bobina B consistía en dos alambres de 30 pies de largo cada uno. Para detectar una posible corriente en B, "conectó sus extremidades mediante un alambre de cobre colocado sobre una aguja magnética". Cuando conectó la bobina A a una batería, observó "un sensible efecto sobre la aguja". Ésta osciló y luego volvió a su posición originaria. Al desconectar la bobina A, de nuevo ocurrió "una perturbación en la aguja". Pero estos resultados no satisficieron a Faraday, que buscaba un efecto continuo. El triunfo lo obtuvo al quinto día: "una barra magnética cilíndrica tenía un extremo insertado en el extremo de un solenoide; entonces movía rápidamente la barrita y la aguja del galvanómetro se movía; luego la movía rápidamente en sentido contrario, y la aguja volvía a moverse, pero en dirección contraria". El efecto se repetía todas las veces que el imán entraba en el galvanómetro o salía y de esta manera se producía corriente eléctrica, por la simple aproximación del imán.

Electroimán de Faraday, empleado para estudiar el magnetismo.

La corriente inducida y la conservación de la energía

Sabemos que una corriente eléctrica es capaz de entregar energía; las corrientes inducidas son capaces de entregar energía: en el secundario puede conectarse una lamparita, que se encenderá al producirse la corriente inducida.

¿De dónde sale esta energía de las corrientes inducidas?

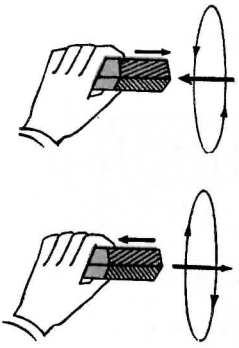
La energía es algo que no puede surgir de la nada; la que entrega la corriente inducida debe provenir de alguna parte.

En la primera experiencia, al acercar el imán se producía una corriente inducida de cierto sentido, representada por una flechita sobre el conductor. Esta corriente inducida crea su propio campo magnético, de modo que la espira se comporta como un imán. De acuerdo con la regla de las agujas del reloj, el sentido de la corriente inducida crea un polo N en la cara de la espira que mira al imán. Ese polo N rechaza al del imán, de modo que debemos gastar cierta energía para acercar el imán. La energía así gastada no se pierde; reaparece en el conductor en forma de energía eléctrica.

Esto explica otro curioso hecho anotado: al alejar el imán, la corriente cambia de sentido. Si cambia de sentido quiere decir que se formará un polo S frente al polo N del imán; ese polo S atraerá al N del imán, y habrá que gastar cierta energía en alejar el imán.

Esa energía tampoco se pierde: también reaparece en el conductor en forma de energía eléctrica.

De aquí podemos extraer una regla, consecuencia del principio de conservación de la energía, útil para determinar el sentido de las corrientes inducidas, y que se llama



La regla de Lenz.

Regla de Lenz

El sentido de la corriente inducida es tal que sus efectos se oponen a las acciones que la generan.

Generación de corriente alterna

De acuerdo con esto, si movemos el imán en un movimiento de vaivén –de ida y vuelta– en el solenoide aparecerá una corriente que cambiará de sentido cuando cambie de sentido el movimiento del imán. En el solenoide, por lo tanto, *se produce una corriente alterna*, cuya frecuencia –número de veces por segundo que cambia de sentido– será igual a la frecuencia del movimiento del imán.

El mismo efecto se logra si se hace girar el imán frente al solenoide, o si se lo suspende y se le da un movimiento pendular.

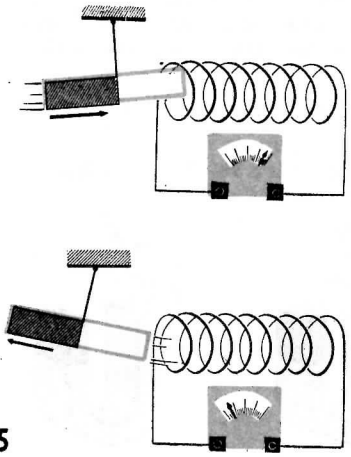
Con corriente se puede producir también corriente alterna: mediante un interruptor podemos abrir y cerrar el circuito primario muchas veces por segundo, y en el secundario aparecerá una corriente alterna.

Luego, si en el primario está alimentado por un generador de corriente alterna, en el secundario aparecerá también corriente alterna.

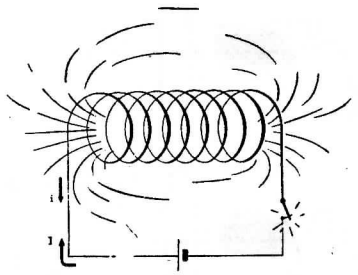
Si en todas las experiencias anteriores se usa una lamparita en lugar de un galvanómetro, permanecerá encendida, porque el efecto térmico es independiente del sentido de la corriente.

Autoinducción

Cuando por un solenoide circula la corriente, se forma a su alrededor un campo magnético, cuyas líneas de fuerza atraviesan sus espiras.



Una idea para producir corriente alterna.



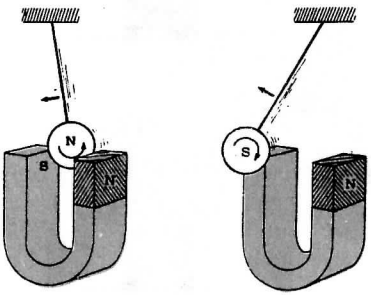
La extracorriente de cierre.

Precisemos: si por el solenoide *no circula* corriente *no hay líneas* de fuerzas magnéticas que lo atraviesen; cuando *circula* corriente, *hay líneas* de fuerza.

Esto significa que cuando se cierra el circuito, el número de líneas de fuerza que atraviesan el solenoide aumenta (antes no las había; al cerrar, aparecen). Cuando se abre el circuito desaparecen las líneas que atravesaban al solenoide.

Por lo tanto, en el solenoide se producen corrientes inducidas por el solenoide sobre sí mismo, al abrir y cerrar el circuito. Por eso esas corrientes se llaman *autoinducidas*, y se superponen a la corriente principal, por lo cual también se las llama *extracorrientes*.

Corrientes parásitas, o de Foucault, recorren el disco y lo frenan.



Con la regla de Lenz podemos determinar sus sentidos. ¿Cuál será el sentido de la *extracorriente de cierre*? Como debe oponerse a las acciones que la generan, y la acción que la genera es el nacimiento de la corriente principal, debe tener *sentido contrario* a esa corriente principal.

¿Cuál será el sentido de la *extracorriente de apertura*? Como la acción que la genera es la desaparición de la corriente, tendrá el *mismo sentido* que la corriente principal.

Corrientes parásitas

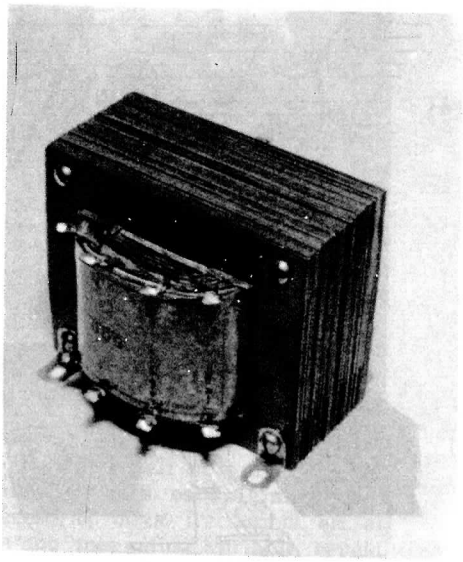
Si entre los polos de un imán potente hacemos oscilar un péndulo como el de la figura, se observará que sus oscilaciones se frenan rápidamente; además, la masa pendular se calienta. ¿Qué ha ocurrido?, que el campo magnético ha variado al moverse el péndulo, por lo cual, de acuerdo con el efecto Faraday, en la masa pendular deben aparecer corrientes eléctricas, que son las que producen el calentamiento. ¿Cuál será el sentido de esas corrientes? Como la acción que las genera es el movimiento, circularán como para impedir ese movimiento, es decir en el sentido requerido para frenar el péndulo.

Estas corrientes, llamadas *parásitas*, de Foucault o de Eddy, son generalmente perjudiciales, porque consumen energía y no rinden provecho. Como aparecen en los núcleos metálicos, se las combate eficazmente con la construcción de los núcleos de los motores, dína-

mos, transformadores, etc., con chapas, aisladas entre sí por barniz, brea, óxido de hierro, etc. De este modo se consigue que entre chapa y chapa haya una gran resistencia eléctrica, suficiente como para que las corrientes parásitas se reduzcan al mínimo.

Pero no en toda ocasión las corrientes de Foucault son "parásitas" e inútiles. El calor que ellas generan puede ser aprovechado, y eso es lo que se hace en los *hornos eléctricos de inducción*. Esos hornos consisten, en esencia, en una bobina por la cual circula una corriente alterna; la masa metálica que se va a fundir hace las veces de núcleo de dicha bobina; las corrientes de Foucault que en ella se inducen provocan el calentamiento y la fusión.

Como las corrientes de Foucault se oponen al movimiento que las genera, pueden ser empleadas como *freno magnético*. El movimiento de la aguja indicadora de instrumentos tales como amperímetros, voltímetros, balanzas, medidores eléctricos domiciliarios, etc., se frena mediante frenos magnéticos. La aguja que debe ser frenada, lleva un pequeño disco, de cobre o aluminio, que gira entre los polos de un imán. Al moverse se generan en el disco las corrientes de Foucault que detienen el movimiento.



Obsérvese el gran número de chapas, que evitan las corrientes de Foucault.

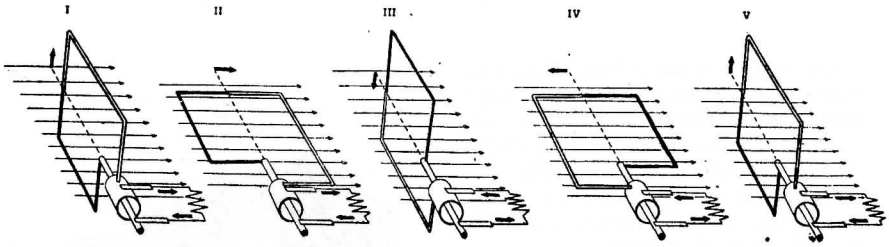
Principio de la dínamo

Una de las más importantes aplicaciones del efecto Faraday, es la *dínamo, aparato que transforma energía mecánica en energía eléctrica.*

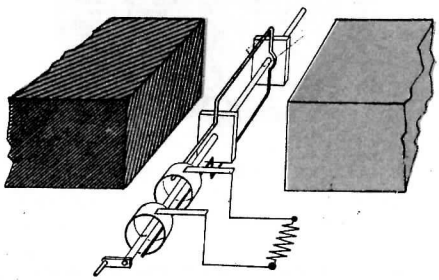
El motor es una máquina que transforma energía eléctrica en mecánica; la función de la dínamo es justamente la inversa: transformar energía mecánica en energía eléctrica.

Consiste, esencialmente, en una bobina o cuadro que se hace girar en un campo magnético.

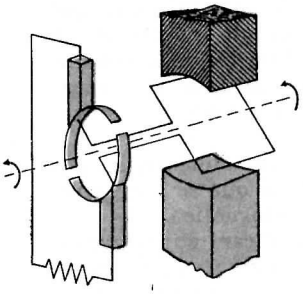
Para simplificar, supongamos que la parte móvil (inducido o rotor) sea un cable en cuadro, colocado entre los polos del imán productor del campo, y representemos simplemente el campo correspondiente. Supongamos que inicialmente el cuadro está en la posición I; gira a la posición II, es decir ¼ de vuelta. Entonces aparece una corriente inducida, cuyo sentido, según la regla de Lenz,



Al girar la espira en el campo magnético de un imán, el flujo magnético que la atraviesa varía continuamente, lo que hace que haya corriente que circula por la espira mientras ésta gira; pero como en ciertos instantes el flujo aumenta, en tanto que en otros disminuye, el sentido de la corriente no se mantiene constante.



Dispositivo para obtener corriente alterna.



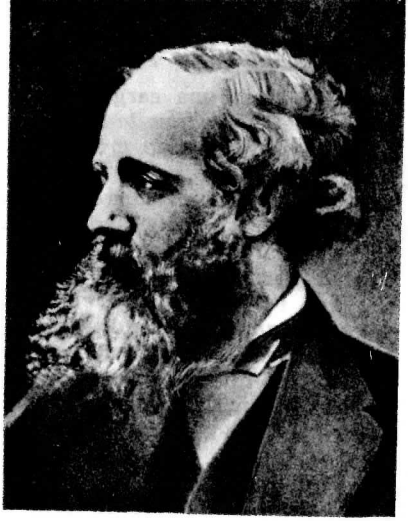
Dispositivo para obtener corriente continua. (Los semianillos conmutan la corriente alterna, transformándola en continua.)

debe ser tal que los efectos de la corriente se opongan a la causa que la genera. Como esta causa es la rotación hacia el polo S, la corriente en la cara que mira al polo S debe circular en el sentido de las agujas del reloj, lo que crea un polo S en esta cara.

Cuando pasa de II a III, la causa que provoca el nacimiento de la corriente es la rotación que aleja a la espira del polo S. En la cara que mira al polo S debe circular ahora una corriente en sentido contrario a las agujas del reloj, creando un polo N. Por lo tanto, en la otra cara la corriente circulará en el sentido de las agujas del reloj. Pero como esta cara es la que antes miraba hacia el polo S (de I a II), *resulta, que en toda la primera media vuelta la corriente recorre el cuadro en el mismo sentido.*

¿Qué ocurre de III a IV? Ahora nos acercamos al polo N del imán creador del campo. En la cara que mira hacia él debe aparecer una corriente de sentido contrario al de las agujas del reloj, para crear un polo N que se oponga al acercamiento de la espira al polo N. Por lo tanto, la corriente cambia ahora de sentido.

Al pasar de IV a V la corriente sigue circulando en el mismo sentido que de III a IV. Conclusión: *durante media vuelta* (I a III), *la corriente circula en un sentido, y en la media vuelta siguiente* (III a V) *circula en sentido contrario.* Vemos así que la dínamo produce *corriente alter-*



James C. Maxwell.

na. Si se quiere obtener CC, hay que *rectificarla* o *conmutarla*. Existen muchos tipos de conmutadores, pero el más sencillo es el conmutador de Paccinotti, formado por dos semianillos de cobre (dispuestos como en la última figura de página 368), de modo que cada vez que en el cuadro se produce un cambio en el sentido de la corriente inducida, los extremos del cuadro pasan de un semianillo al otro. En esta forma, cada semianillo mantiene constante su polaridad.

La dínamo y el motor son máquinas reversibles

Si en el motor hacemos circular una corriente eléctrica por el cuadro, obtenemos un movimiento de rotación. En la dínamo es a la inversa: si nosotros movemos el cuadro, en éste se produce una corriente eléctrica.

El campo electromagnético

Hacia 1864 el físico inglés James C. Maxwell analizó cuidadosamente los efectos Faraday y Oersted y llegó así a una concepción genial: la del *campo electromagnético*.

Como hemos visto, el efecto Faraday consiste en que al variar el campo magnético que pasa a través de una espira, por ésta se induce una corriente eléctrica. Ésta no es otra cosa que cargas eléctricas en movimiento; y para que estas cargas se muevan sobre ellas debe actuar *un campo eléctrico*. Maxwell comprendió así que la espira es solamente un accesorio, cuya frecuencia en el campo magnético variable *revela* la producción de un campo eléctrico; lo esencial es que la *variación de un campo magnético produce un campo eléctrico*. Por lo tanto (ver figura inferior, de página 446), si analizamos lo que ocurre en un punto P del espacio situado a una cierta distancia de una bobina en la que existe un campo magnético, podemos decir que toda vez que *varía el campo magnético* de la bobina *aparece en P* –y en cualquier otro punto del espacio– *un campo eléctrico*.

Analizando el efecto Oersted con el mismo espíritu, Maxwell llegó a análoga conclusión. Como vimos, el efecto Oersted consiste en que cuando por un conductor circula corriente, se establece un campo magnético que lo rodea; pero lo importante no es la presencia de un campo eléctrico variable (creado por las cargas eléctricas en movimiento), como lo demostraría Rowland años después

haciendo girar una carga eléctrica. Lo esencial es que *la variación de un campo eléctrico produce un campo magnético.* Por lo tanto, analizando lo que ocurre en un punto P del espacio situado a una cierta distancia de un conductor eléctrico, podemos decir que *toda vez que varía el campo eléctrico del conductor* (acelerando sus cargas eléctricas, por ejemplo, que no es otra cosa que hacer circular por él una corriente eléctrica variable) *aparece en P* –y en cualquier otro punto del espacio– *un campo magnético.*

Y entonces Maxwell se formuló la siguiente pregunta genial: ¿qué pasaría en el punto P si el campo eléctrico creado en él por la variación del campo magnético (efecto Faraday) fuera también variable? Pues que, de acuerdo con el efecto Oersted, crearía a su vez, un campo magnético. ¿Y si éste también fuera variable? Crearía, por el efecto Faraday, otro campo eléctrico cuya variación podría a su vez crear otro campo magnético... y así sucesivamente. La variación de un campo generaría el otro campo y de esa forma el conjunto de los dos campos –que Maxwell llamó campo *electromagnético*– se *propagaría* por *todo* el espacio. Esta concepción asombró a los contemporáneos de Maxwell. De ella resultaba, por ejemplo, una posibilidad fantástica: la comunicación a distancia ¡sin hilos!, simplemente a través del espacio. En efecto: imaginemos un circuito eléctrico donde, por algún medio, podamos producir variaciones de los campos eléctrico y magnético existentes en él. Estas variaciones, según Maxwell, se propagarían a todo el espacio. Si en un punto cualquiera encontrásemos la manera de *revelar* las variaciones del campo electromagnético que en él se producen –como la espira *revela* la existencia de un campo eléctrico producida por la variación de un campo magnético en el efecto Faraday– entonces podríamos *recibir el mensaje electromagnético* producido en el circuito. Esto parecía sencillamente increíble. Veinte años más tarde y cuando Maxwell ya había fallecido, el físico alemán H. Hertz probaba que ello era absolutamente cierto*. Vendrían luego la telegrafía sin hilos, la radiotelefonía, la televisión...

Pero el genio teórico de Maxwell lo llevó a una conclusión aún más extraordinaria. Se formuló dos simples preguntas:

¿Cómo se propaga el campo electromagnético?

¿A qué velocidad se propaga el campo electromagnético?

Y las respuestas fueron asombrosas:

El campo electromagnético se propaga por ondas transversales, a las que llamó ondas electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas se propagan a 300 000 km/s, es decir ¡a la velocidad de la luz!

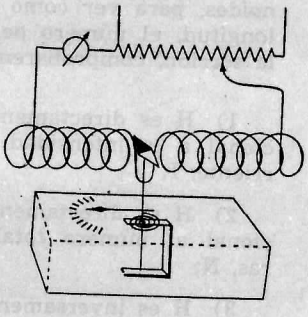
Pero entonces: ¿es la luz un fenómeno electromagnético? ¿Son las ondas luminosas simplemente ondas electromagnéticas visibles? ¿Es la Óptica una parte del Electromagnetismo? ¿Existirán otras ondas electromagnéticas invisibles?

---

* Véase capítulo 26.

24 EL EFECTO OERSTED Y SUS APLICACIONES

Estudiaremos ahora en forma cuantitativa, todos los fenómenos vinculados con el efecto Oersted: *toda corriente eléctrica crea un campo magnético.*



Esquema de un magnetómetro.

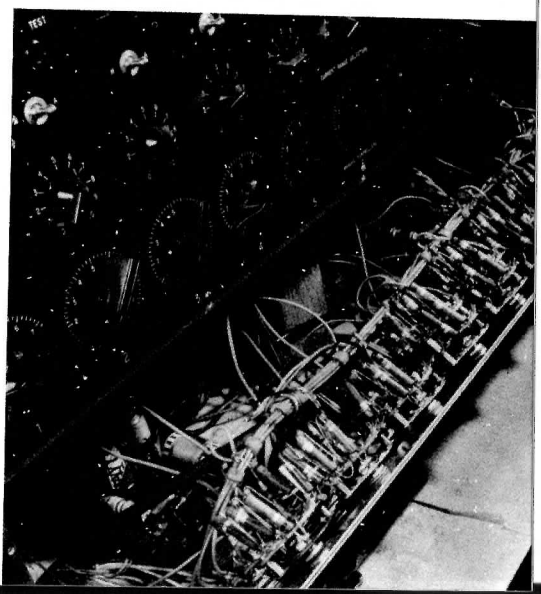
Campo magnético creado por un solenoide

Para estudiar el campo magnético creado por un solenoide se usa el *magnetómetro*, aparato con el cual se puede medir la intensidad de un campo magnético. Colocado en un punto del campo creado por un imán o un solenoide, con su eje perpendicular al campo, la aguja del magnetómetro gira un ángulo, que depende de la intensidad del campo en ese punto.

Si se mide la intensidad en distintos puntos del campo de un solenoide se encuentra que:

1) *En los puntos interiores del solenoide, el campo es mucho más intenso que en los exteriores;*

Equipo electrónico cuyo funcionamiento es posible en buena parte gracias al efecto Oersted.



2) *El campo no tiene el mismo valor en todos los puntos interiores: es máximo en el punto medio.*

La intensidad del campo en los puntos interiores alejados de los extremos varía poco cuando el solenoide es largo; y si es muy largo, se puede admitir que el campo tiene el mismo valor en todo su interior.

Estudiando el campo en los puntos interiores de varios solenoides, para ver cómo influye la longitud, el número de espiras y la sección, comprobaremos que:

1) H es directamente proporcional a la intensidad de la corriente, I;

2) H es directamente proporcional al número total de espiras, N;

3) H es inversamente proporcional a la longitud del solenoide *l*.

Estos tres resultados se expresan con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

El cociente N/l representa el número de espiras que hay en cada unidad de longitud; si lo llamamos n, la fórmula que da la intensidad del campo es:

$$H = n\,I$$

Esta fórmula es más usada que la anterior, porque en un bobinado uniforme es más sencillo contar el número de espiras en cada unidad de longitud que en toda la bobina.

Una nueva unidad de campo magnético

El campo de un imán se mide en *Oersted* (Oe); en cambio, es muy común que el campo creado por un solenoide se mida en una unidad que deriva de la última fórmula: el $\frac{\text{ampere-espira}}{\text{cm}}$ llamado también $\frac{\text{ampere-vuelta}}{\text{cm}}$, que simbolizaremos $\frac{\text{A - e}}{\text{cm}}$, que se puede definir así:

$1\,\frac{\text{A - e}}{\text{cm}}$ *es el campo creado por una corriente de 1 A en el interior de un solenoide que tiene 1 espira por cada centímetro.*

Su equivalencia con el Oe, que se obtiene *experimentalmente*, es

$$1\,\frac{\text{A - e}}{\text{cm}} = 1{,}256\ \text{Oe}$$

Como $4\pi = 12{,}56$, se puede decir que

$$1\,\frac{\text{Ae}}{\text{cm}} = \frac{4\pi}{10}\ \text{Oe}$$

De acuerdo con esto, si se quiere expresar en Oe el campo creado en el interior de un solenoide, la fórmula será:

$$H = \frac{4\pi}{10}\,n\,I$$

EJEMPLOS: *Calcular en* $\frac{\text{A - e}}{\text{cm}}$ *la componente horizontal del campo magnético terrestre en Buenos Aires, que vale 0,24 Oe.*

Como:

$$1{,}256 \text{ Oe} = 1 \frac{\text{A - e}}{\text{cm}},$$

$$0{,}24 \text{ Oe} = \frac{0{,}24}{1{,}256} \frac{\text{A - e}}{\text{cm}} \cong 0{,}19 \frac{\text{A - e}}{\text{cm}}$$

Por una bobina que tiene 100 espiras en cada centímetro circula una corriente de $I = 10$ A. ¿Cuál es el campo en su centro?

$$H = n\,I = 100 \text{ e/cm} \cdot 10 \text{ A} = 1\,000 \text{ A-e/cm}$$

Expresada en Oe, la intensidad del campo es:

$$H = 1\,000 \cdot 1{,}256 \text{ Oe} = 1\,256 \text{ Oe}$$

La fórmula $H = n\,I$ expresa, entre otras cosas, que es posible crear campos intensos con corrientes débiles, siempre que se coloque un número suficientemente grande de espiras en cada unidad de longitud.

Además, se observa también que la sección del solenoide no interviene: dos solenoides que posean el mismo número de espiras por centímetro y que sean atravesados por la misma intensidad de corriente, crean en su interior campos iguales aunque sus secciones sean diferentes. Por lo tanto, si se construye un solenoide de varias capas de espiras, para determinar la intensidad del campo en su interior habrá que contar solamente el número de espiras que hay en cada centímetro de longitud, incluyendo todas las capas.

Solenoide anular o toroidal

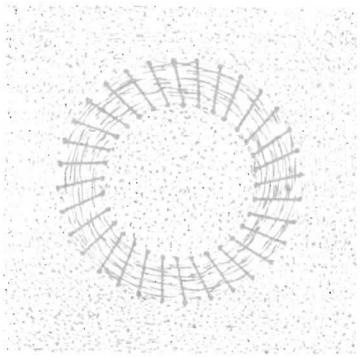
¿Qué ocurre con el valor de H si cerramos un solenoide largo, dándole forma de anillo o toroide? El magnetómetro nos indica que:

1) En el exterior, el campo magnético vale cero;

2) En el interior vale lo mismo en todos los puntos:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} \quad \text{o} \quad H = n\,I$$

Como valor de l se toma ahora el de la circunferencia media del solenoide.



Solenoide toroidal.

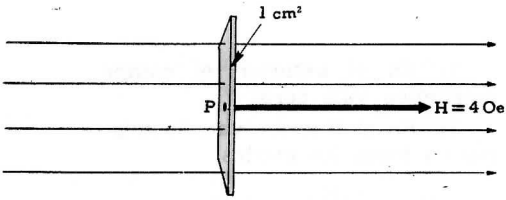
EJEMPLO: *Calcular el campo en el interior de un solenoide toroidal cuyo bobinado, de 200 espiras, es recorrido por una $I = 2$ A. El radio de la circunferencia media mide 10 cm.*

$$l = 2\,\pi\,r = 2\,\pi \cdot 10 \text{ cm} = 62{,}8 \text{ cm}$$

$$H = \frac{I\,N}{l} = \frac{2 \text{ A} \cdot 200 \text{ esp.}}{62{,}8 \text{ cm}} = 6{,}4 \frac{\text{A - e}}{\text{cm}}$$

La convención de Faraday

El campo de un solenoide puede estudiarse mediante su espectro magnético. Como hemos visto en



En P, el campo vale 4 Oe; luego, por una superficie de 1 cm², normal a las líneas de fuerza y cuyo centro es P, pasan 4 líneas de fuerza.

el capítulo anterior, el espectro indica que en el interior el campo es mucho más intenso que en el exterior; que las líneas son prácticamente paralelas en el interior, etc. Podemos comparar los campos creados por dos solenoides, comparando sus respectivos espectros y tratando de determinar a cuál corresponde mayor número de líneas de fuerza.

Aquí se presenta una dificultad casi insuperable: *el número de líneas de fuerza de cualquier imán o solenoide es infinito.* Pero Faraday encontró la forma de eliminar este inconveniente, *conviniendo* en limitar el número de líneas de la siguiente manera: Si en un punto, H vale 1 Oe, se hace pasar –por CONVENCIÓN– por cada centímetro cuadrado, normal a H, una línea simbólica de fuerza. Si en otro punto H vale 4 Oe, representaremos esa intensidad haciendo pasar por cada superficie de 1 cm², normal a H y que tenga a ese punto por centro, 4 líneas simbólicas. Y viceversa: si por un cuadrado de 1 cm², con centro en P, pasan 4 líneas simbólicas, diremos que el campo en P vale 4 Oe. ¿Cómo procederemos cuando el campo en P vale, por ejemplo, ½ Oe? Decimos que pasa 1 línea simbólica cada 2 cm².

En adelante diremos simplemente *líneas de fuerza*, en lugar de decir líneas simbólicas, pero téngase muy en cuenta que la representación mediante líneas simbólicas es *puramente convencional.*

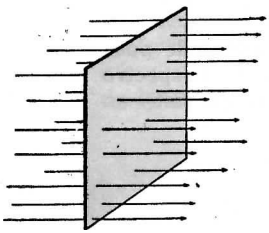
Por lo tanto, de acuerdo con la convención de Faraday, el valor de H en un punto está representado por el número de líneas de fuerza que atraviesan 1 cm² colocado normalmente a las líneas de fuerza, con ese punto como centro.

Definición de flujo magnético

Gracias a la convención de Faraday, resulta sencillo comparar los espectros de dos campos. Se llama *flujo magnético* a través de una superficie al número *total* de líneas de fuerza que atraviesan esa superficie. Si la superficie vale S cm², como por cada centímetro cuadrado pasan H líneas, de acuerdo con la convención de Faraday, el número total de líneas que pasan por S vale $H \cdot S$.

Por lo tanto, el flujo magnético a través de una superficie S colocada normalmente a las líneas de fuerza, en un punto donde la intensidad del campo es H, será igual al producto $H \cdot S$. Representaremos el flujo por la letra griega Φ (fi), de modo que:

$$\Phi = H \cdot S$$



El flujo magnético a través de esta superficie vale 15 Mx, pues a través de ella pasan 15 líneas de fuerza.

Unidad de flujo

Si se mide H en Oe y S en cm², el flujo resulta medido en Oe × cm², que no es otra cosa que

el número de líneas. En honor de J. C. Maxwell, célebre físico inglés, se ha convenido en llamar *maxwell* a esta unidad de flujo, de modo que

$$1\ \text{Mx} = 1\ \text{Oe} \cdot 1\ \text{cm}^2$$

El flujo, cuando la superficie es oblicua

Cuando la superficie es oblicua a las líneas de fuerza, el número de líneas de fuerza que la atraviesan es menor, y tanto menor cuanto mayor es el ángulo. En ese caso, la sección AB es atravesada por tantas líneas como su proyección A′ B′. A través de ésta, el flujo vale

$$\Phi = \text{H} \cdot \text{S}',$$

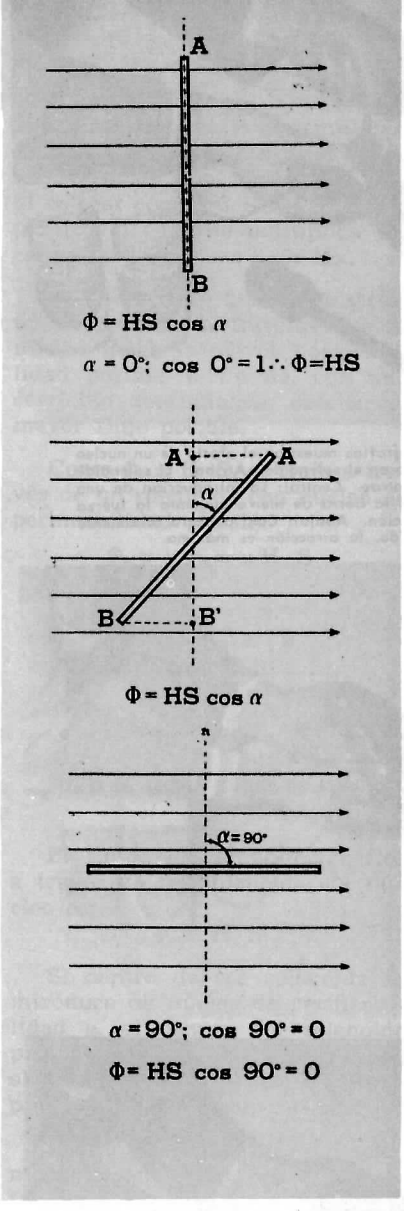
pues A′ B′ es normal a H.

Como

$$\text{S}' = \text{S} \cos \alpha\,,$$

resulta:

$$\boxed{\Phi = \text{H S} \cos \alpha}$$



Valor del flujo a través de un solenoide

Como $\Phi = \text{H S}$, y $\text{H} = \dfrac{4\pi}{10}\, n\, \text{I}$.

Resulta:

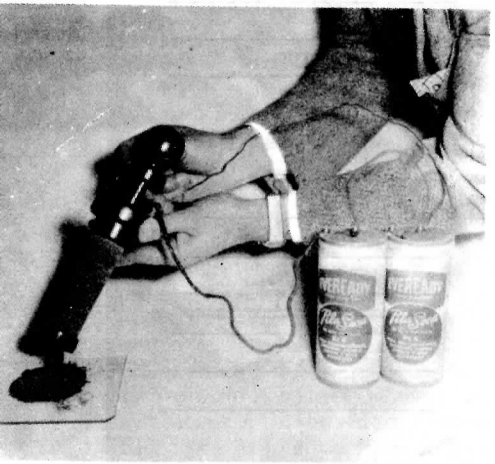
$$\Phi = \frac{4\pi}{10}\, n\, \text{I S}$$

EJEMPLO: *Por una bobina de 80 cm de longitud, 12 cm de diámetro y 720 espiras, circula una corriente de 8 A. Calcular el flujo que la atraviesa.*

$$\text{S} = \pi r^2 = 3{,}14 \cdot 36\ \text{cm}^2 \cong 113\ \text{cm}^2$$

$$= \Phi\ \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{\text{N}}{l} \cdot \text{I} \cdot \text{S} = \frac{4\pi \cdot 720\ e \cdot 8\ \text{A} \cdot 113\ \text{cm}^2}{10 \cdot 80\ \text{cm}} \cong 10\,200\ \text{Mx}$$

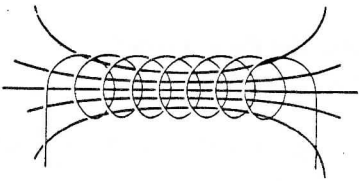
Las fotografías muestran el efecto de un núcleo de hierro en el solenoide. Arriba): El solenoide apenas atrae. Centro): La introducción de una parte de la barra de hierro aumenta la fuerza de atracción. Abajo): Con la barra totalmente introducida, la atracción es máxima.



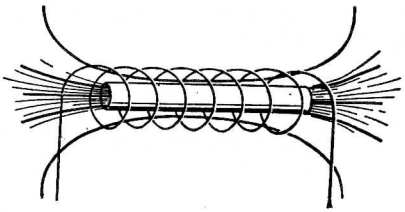
Bobina con núcleo metálico

Si frente a un solenoide colocamos limaduras de hierro, atrae cierta cantidad; pero si introducimos una barra de hierro dulce en el interior del solenoide, atrae mayor cantidad, porque al magnetismo propio del solenoide se suma el inducido en la barra de hierro. En esa propiedad se basan los electroimanes, que sólo son, como veremos más adelante, solenoides con núcleos de hierro o de otras aleaciones especiales.

Si se realiza el espectro del solenoide, primero sin núcleo y luego con él, se comprobará que en el segundo caso el número de líneas de fuerza es mucho mayor.



Al flujo de campo se le suma el flujo propio del núcleo; el total da el flujo de inducción.



Permeabilidad magnética de una sustancia

Cuando en un campo magnético se coloca un trozo de hierro, se observa que las líneas modifican su trayectoria, para poder pasar a través del hierro, como si ese camino resultara más sencillo que a través del aire. Ya antes hemos hablado de esta importante propiedad del hierro; ahora podremos expresarla cuantitativamente. Llamemos Φ_a al flujo a través del solenoide cuando está sin núcleo, es decir, cuando en su interior sólo hay aire; y Φ_n al flujo a través del solenoide cuando éste posee núcleo metálico.

DEFINICIÓN: *Se llama permeabilidad magnética de una sustancia, el cociente entre el flujo Φ_n que atraviesa a un solenoide con núcleo de esta sustancia, y el flujo Φ_a que lo atraviesa cuando no tiene núcleo.*

En símbolos, representando a la permeabilidad con la letra griega μ (mu):

$$\mu = \frac{\Phi_n}{\Phi_a};$$

Φ_n y Φ_a se miden en *Mx*, de modo que μ resulta un número abstracto, sin unidad. Para el aire resulta $\mu = 1$, lo que es natural, pues hemos tomado al aire como sustancia de comparación.

Decir que una sustancia tiene una permeabilidad magnética $\mu = 100$ significa que al colocar una barra de esa sustancia como núcleo de un solenoide por el que pasa un cierto flujo, éste se hace 100 veces mayor. Por ejemplo: si hay un flujo de 83 Mx a través de un solenoide con núcleo de aire, al colocar como núcleo la barra de $\mu = 100$ el flujo se multiplica 100 veces, es decir, vale 8 300 Mx.

Se comprende que al construir un electroimán se trate de que su núcleo tenga la mayor permeabilidad posible, a fin de, con una corriente determinada, obtener el mayor flujo posible.

Como $\Phi_a = H \cdot S$, el flujo a través de un solenoide con núcleo de permeabilidad μ vale:

$$\Phi_n = \mu \Phi_a = \mu H \cdot S$$

$$\boxed{\Phi_n = \mu \frac{4\pi}{10} n I S}$$

Flujo de campo y flujo de inducción

El flujo del campo magnético a través de un solenoide sin núcleo es:

$$\Phi_a = H \cdot S$$

Si dentro de ese solenoide se introduce un núcleo de permeabilidad μ, el campo del solenoide provoca magnetismo inducido en el núcleo. Éste produce ahora pues, su propio campo.

Por lo tanto, a través del solenoide pasan ahora las líneas de fuerza de su propio campo y las líneas de fuerza del campo producido por el núcleo. Se llama *flujo de inducción* al flujo del conjunto de esas líneas de fuerza. Lo hemos representado ya con Φ_n.

Densidad del flujo de inducción a través de un núcleo

Una magnitud muy empleada en electromagnetismo es la *densidad del flujo de inducción*, que representa la cantidad de líneas de inducción que atraviesan cada centímetro cuadrado del núcleo. Si la sección del núcleo es S, y el flujo de inducción que lo atraviesa es Φ_n, la densidad del flujo de inducción es:

$$B = \frac{\Phi_n}{S}$$

Unidad de densidad de flujo

Si el flujo de inducción se mide en *maxwells* y la superficie en *centímetros cuadrados*, la unidad de densidad de flujo que se obtiene es Mx/cm^2, a la que se llama *gauss*:

$$1 \text{ gauss} = \frac{1 \text{ maxwell}}{1 \text{ cm}^2}$$

Campo magnético y densidad de flujo de inducción

De acuerdo con la definición de densidad de flujo de inducción,

$$B = \frac{\Phi_n}{S},$$

y de acuerdo con la definición de permeabilidad magnética

$$\Phi_n = \mu H \cdot S,$$

con lo que resulta:

$$B = \frac{\mu H \cdot S}{S},$$

o sea:

$$B = \mu H$$

Si el solenoide carece de núcleo, o, lo que es lo mismo, el núcleo es de aire, cuya permeabilidad magnética vale 1, se tiene:

$$B = H$$

Esto significa que en aire la intensidad del campo coincide con la densidad del flujo de inducción. Cuando se coloca un núcleo de permeabilidad μ, la intensidad del campo magnético del solenoide sigue siendo la misma, pero la densidad del flujo de inducción ha aumentado μ veces.

EJEMPLO: *Calcular la densidad del flujo de inducción en el núcleo de hierro ($\mu = 100$) de un solenoide toroidal de 50 espiras por centímetro y 5 cm^2 de sección por el que circula una corriente de 10 A.*

$$B = \mu H;$$

$$H = \frac{4\pi}{10} \cdot 50 \frac{e}{\text{cm}} \cdot 10 \text{ A} = 628{,}3 \text{ Oe};$$

$$B = 100 \cdot 628{,}3 \text{ gauss} = 62\,830 \text{ gauss}$$

Haya o no núcleo de hierro, la intensidad del campo magnético creado por el solenoide es de 628,3 Oe, lo que significa que por cada centímetro cuadrado pasan 628,3 líneas de fuerza magnética creadas por el solenoide.

Cuando se coloca el núcleo de hierro aparecen las líneas de inducción, y pasan en total 62 380 líneas por cada centímetro cuadrado del núcleo.

Propiedades de la permeabilidad

El fenómeno de la permeabilidad se presenta no sólo en el hierro o el acero, sino también en

todas las sustancias. Aunque muchas de éstas parecieran no magnéticas –como la madera, el papel, el cobre, etc.–, lo cierto es que Faraday probó que, sin excepción, *todas las sustancias se magnetizan.* Lo que ocurre es que, en la gran mayoría de los casos, se requiere un campo magnetizador o inductor muy intenso.

La capacidad de magnetización de una sustancia se refleja en el valor de su permeabilidad. Cuanto mayor es μ, más fácil e intensamente magnetizable es una sustancia. En la tabla adjunta se observan las altas permeabilidades que tienen el hierro, el cobalto, el acero, etc., y lo bajas que son las del bismuto, cobre, nitrógeno, etc.

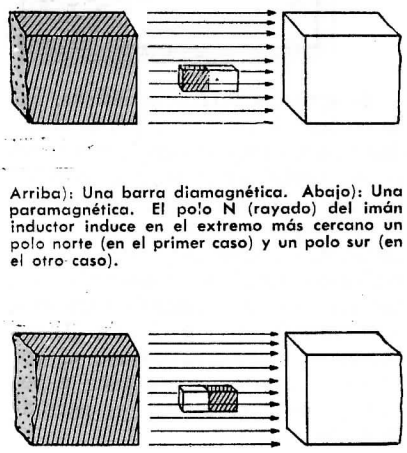
TABLA DE PERMEABILIDADES

Antimonio	0,999 952	
Bismuto	0,999 824	
Cobre	0,999 99	
Nitrógeno	0,999 999 995	
Agua	0,999 999 92	
Aire	1	
Aluminio	1,000 022	
Cloruro de hierro	1,003 9	
Cobalto	hasta 170	con $H = 20$ Oe
Níquel	hasta 1 000	con $H = 3$ Oe
Permalloy	hasta 100 000	con $H = 2{,}5$ Oe
Perminvar	hasta 2 000	con $H = 0{,}002$ Oe
Acero	hasta 1 500	con $H = 4{,}5$ Oe
Hierro	hasta 7.000	con $H = 1$ Oe

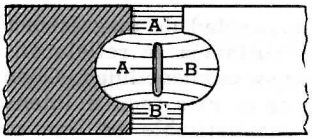
De acuerdo con el valor de μ, podemos clasificar las sustancias magnéticas en tres grupos:

Sustancias paramagnéticas, que tienen permeabilidad constante y *mayor que 1.* Entre ellas figuran el cinc, el platino, el manganeso, el calcio, el aluminio, el oxígeno, el cloruro férrico, etc.

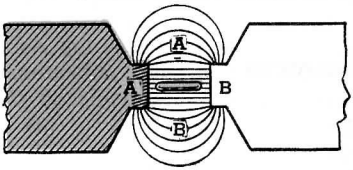
Sustancias diamagnéticas con permeabilidad constante y *menor que 1.* Entre ellas figuran el bronce, el vidrio, la mayoría de los gases (hidrógeno, cloro, helio, etc.), el papel, la madera y casi todas las sustancias que generalmente calificamos de no-magnéticas.

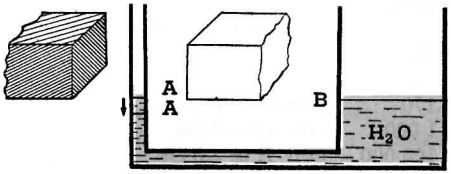


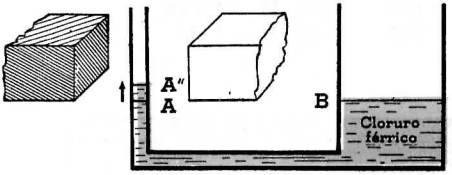
Arriba): Una barra diamagnética. Abajo): Una paramagnética. El polo N (rayado) del imán inductor induce en el extremo más cercano un polo norte (en el primer caso) y un polo sur (en el otro caso).



Las sustancias paramagnéticas se mueven hacia las regiones donde el campo es más intenso; las diamagnéticas, hacia donde el campo es menos intenso.







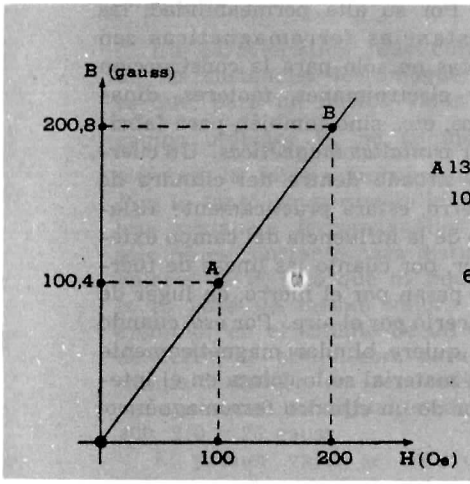
Sustancias ferromagnéticas, caracterizadas por una permeabilidad mucho mayor que 1, y *que no es constante* (en la tabla damos los valores máximos), sino que depende del valor del campo a que están sometidas y también de la "historia magnética" del material. Son las sustancias magnéticamente más importantes, y a ellas pertenecen el hierro, el níquel, el cobalto, y ciertas aleaciones especiales, como el alnico, el permalloy, etc.

Experimentalmente puede distinguirse entre una sustancia paramagnética y una diamagnética por la siguiente propiedad: colocadas en un campo magnético, la *sustancia paramagnética se mueve hacia las regiones donde el campo es más intenso*, mientras que la *diamagnética se mueve hacia donde el campo es menos intenso.*

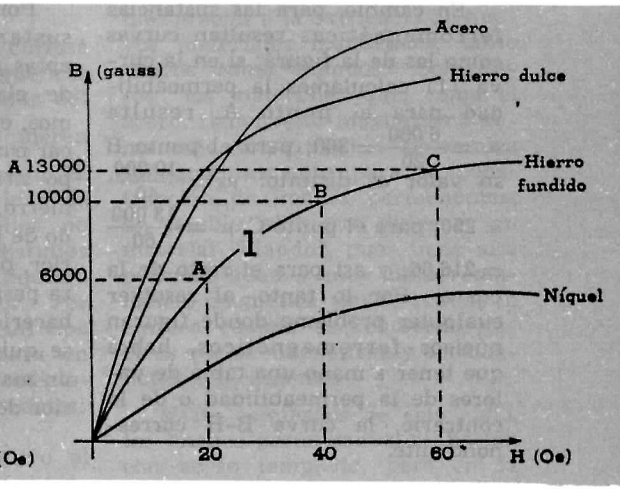
En la figura se muestra una cápsula con cristalitos de cloruro férrico –sustancia paramagnética– que, al ser suspendida por su centro de gravedad pasa de la posición AB a la A' B', de modo de situarse en la región de campo más intenso. Si en lugar de la ampolla suspendemos una aguja de bismuto –que es diamagnético–, inicialmente en la posición AB, al establecerse el campo magnético pasa a la posición A' B', donde el campo es más débil.

Con sustancias líquidas y un dispositivo como el de la figura pueden realizarse experiencias interesantes. Cuando no hay campo, el líquido alcanza el mismo nivel en ambos tubos (A y B). Al establecerse el campo, si el líquido es diamagnético –por ejemplo, agua destilada– tiende a salir del campo, por lo cual el nivel A bajará a A'. En cambio, usando una solución de cloruro férrico, el nivel A subirá a A''.

También se puede experimentar con gases, inflando burbujas con el gas que se quiere probar, que se introducen en el entrehierro de un potente electroimán.



Cómo varía la inducción en una sustancia paramagnética cuando se hace variar la intensidad del campo magnético.



Cómo varía la inducción en una sustancia ferromagnética cuando varía la intensidad del campo magnético.

Las sustancias ferromagnéticas

Por su gran importancia en la técnica, las sustancias ferromagnéticas merecen párrafo aparte. Sus características esenciales son:

Permeabilidad variable

En las sustancias paramagnéticas, la permeabilidad es constante, de modo que tiene perfecto sentido decir que el aluminio tiene *una* permeabilidad 1,000 022. En cambio, para el hierro podemos decir que su permeabilidad vale 100, ó 10, ó 1 000, o cualquier otro valor, porque depende del campo inductor donde esté. Por ejemplo: ensayos efectuados con una cierta clase de hierro han dado los siguientes valores de la permeabilidad: para un campo inductor $H = 6{,}5$ Oe, un valor de $\mu = 1\,075$; para $H = 47{,}5$ Oe, $\mu = 326$; para $H = 160$ Oe, $\mu = 116$, etc.

Si representamos en un diagrama los distintos valores de inducción B obtenidos con diferentes valores del campo inductor H, para una sustancia paramagnética (cloruro férrico) obtendremos una recta como la de la figura, que indica que la *permeabilidad es constante*. Para un campo inductor de $H = 100$ Oe, resulta (punto A) una inducción $B = 100{,}4$ gauss; como $\mu = \frac{B}{H}$, la permeabilidad vale entonces $\mu = \frac{100{,}4}{100} = 1{,}004$. Para $A = 200$ Oe, la inducción es $B = 200{,}8$ gauss (punto B) y la permeabilidad también vale:

$$\mu = \frac{200{,}8}{200} = 1{,}004, \text{ etc.}$$

En cambio, para las sustancias ferromagnéticas resultan curvas como las de la figura; si en la curva (1) calculamos la permeabilidad para el punto A, resulta $\mu_a = \frac{6\,000}{20} = 300$; para el punto B su valor es distinto: $\mu_b = \frac{10\,000}{40} = 250$; para el punto C, $\mu_c = \frac{13\,000}{60} = 216{,}66$; y así para el resto de la curva. Por lo tanto, al resolver cualquier problema donde figuran núcleos ferromagnéticos, habrá que tener a mano una tabla de valores de la permeabilidad o de lo contrario, la curva B-H correspondiente.

Elevada permeabilidad

Las sustancias ferromagnéticas son muy empleadas en la técnica, por el elevado valor de μ. En la tabla de la página 379 damos valores máximos de la permeabilidad de algunas sustancias. También hemos indicado con qué campo inductor adquieren esas permeabilidades, única forma de poder comparar dos sustancias ferromagnéticas entre sí. Se ve que el perminvar (aleación de hierro, níquel y cobalto) alcanza una permeabilidad 2 000 con un campo inductor de 0,002 Oe, es decir que basta un campo cien veces menor que el débil campo terrestre para magnetizar un trozo de perminvar. El permalloy (hierro y níquel) es otra aleación valiosa, por el elevado valor de su permeabilidad. Los valores de la tabla son aproximados, pues habrá que tener en cuenta, en cada caso especial, el fenómeno de histéresis, desarrollado en la siguiente página.

Por su alta permeabilidad, las sustancias ferromagnéticas son aptas no sólo para la construcción de electroimanes, motores, dínamos, etc., sino también para fabricar *pantallas magnéticas*. Un cuerpo situado dentro del cilindro de hierro, estará prácticamente aislado de la influencia del campo exterior, por cuanto las líneas de fuerza pasan por el hierro, en lugar de hacerlo por el aire. Por eso, cuando se quiere blindar magnéticamente un material se lo coloca en el interior de un cilindro ferromagnético.

Remanencia

Es la propiedad que tienen las sustancias ferromagnéticas de no perder su magnetismo al desaparecer el campo inductor.

Si un acero adquiere una inducción de 5 000 gauss para un campo inductor de 20 Oe, por ejemplo, cuando el campo inductor se anula, se puede comprobar en el acero una inducción remanente apreciable, pongamos por ejemplo, de 700 gauss.

Todas las sustancias ferromagnéticas presentan esta particularidad, aunque en algunas se manifiesta más que en otras. La aleación *Alnico* (aluminio, níquel, cobalto y hierro) tiene una elevada remanencia, por lo cual se la emplea en la construcción de magnetómetros sensibles, pick-ups magnéticos, núcleos de motores, etc.

Histéresis

La característica más curiosa de las sustancias ferromagnéticas es que, para un mismo valor del campo inductor $\vec{H}$, no adquieren siempre la misma inducción $\vec{H}$. Por lo tanto, la permeabilidad de una sustancia ferromagnética no sólo no es constante para distintos valores de H, sino que ni siquiera lo es para un mismo valor. Por ejemplo: en el estudio de un tipo de acero, se obtuvieron, para un campo de 200 Oe, en tres mediciones sucesivas, los siguientes datos: 300, 210 y 25 gauss.

El primer valor se obtuvo al magnetizar por primera vez el trozo de acero estudiado, es decir, cuando el material estaba "magnéticamente virgen", y los otros dos lo fueron, en cambio, cuando había magnetismo remanente. Este fenómeno se llama *histéresis* de la sustancia; si se le quisiera dar un nombre más sencillo, habría que llamarlo "memoria", porque la forma como la sustancia se comporta depende de su "pasado magnético".

Materiales magnéticos modernos

La mayoría de las modernas aplicaciones del magnetismo y electromagnetismo han sido posibles gracias a la existencia de nuevos materiales magnéticos, tanto "duros" como "blandos". Son "duros" los materiales que, como el acero, tienen alto magnetismo remanente, por lo cual se los emplea fundamentalmente para la construcción de imanes permanentes; en cambio, el hierro dulce es un material "blando", pues tiene alta permeabilidad y muy baja remanencia magnética, por lo cual se lo emplea cuando se requieren núcleos que se magneticen y desmagneticen fácilmente.

Hasta comienzos de este siglo, los imanes permanentes se hacían con acero templado, pero en la actualidad han surgido nuevas aleaciones que superan a los aceros. Hoy se dispone de imanes permanentes con una imanación remanente de 12 000 gauss, muy superior a los 9 000 gauss de remanencia de los aceros con 1 % de carbono.

Otra cualidad importante es que los materiales "duros" modernos tienen la propiedad de retener sus propiedades magnéticas a temperaturas considerablemente más elevadas que los aceros magnéticos antiguos. Los datos siguientes muestran la notoria superioridad del Alnico (aleación de hierro, aluminio, níquel y cobalto), con respecto a aceros:

Material	*Porcentaje de magnetismo remanente*		
	A 200 C	400 C	600 C
Acero con 6 % de tungsteno	65 %	16 %	1 %
Acero con 35 % de cobalto	91 %	60 %	22 %
Alnico	98 %	95 %	78 %

Imán levantando un pedazo de aceite magnetizado.

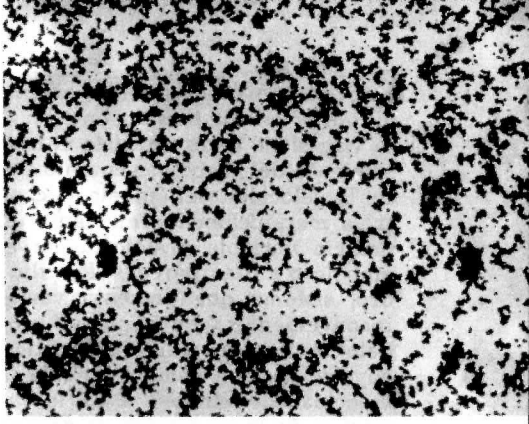
Las características magnéticas de una aleación dependen no sólo de sus elementos, sino también de los tratamientos térmicos a que se los someta durante su fabricación. Así, si un imán de Alnico se enfría, desde su temperatura de temple, en un intenso campo magnético, se obtiene un imán cuyo magnetismo remanente es muy intenso en una dirección, y mucho más débil en otras direcciones.

Si se analizan las características de algunos de los materiales "blandos" más usados en la actualidad, se aprecia cómo el hierro dulce ha sido superado ampliamente por aleaciones especiales. El "campeón" es el supermalloy, que alcanza una permeabilidad de 800 000 gauss.

Recipiente con aceite magnético colocado en el interior de una bobina. Por ésta no pasa corriente todavía.

Por la bobina pasa ahora corriente, y el aceite se solidifica. Se advierte que al hacerlo, las partículas se han orientado en el campo, formando como un espectro.

Un descubrimiento reciente, de gran importancia práctica, es el de las cerámicas ferromagnéticas o "ferritas", mezclas de cristales de óxido de hierro y otros óxidos metálicos, como los de magnesio, cinc, níquel, etc., la permeabilidad de las ferritas vale aproximadamente 1 000 gauss. Su principal ventaja reside en su gran resistividad eléctrica, debido a que en su fabricación no intervienen metales, por lo cual las corrientes de Foucault que se generan en los núcleos de ferrita son muy débiles.

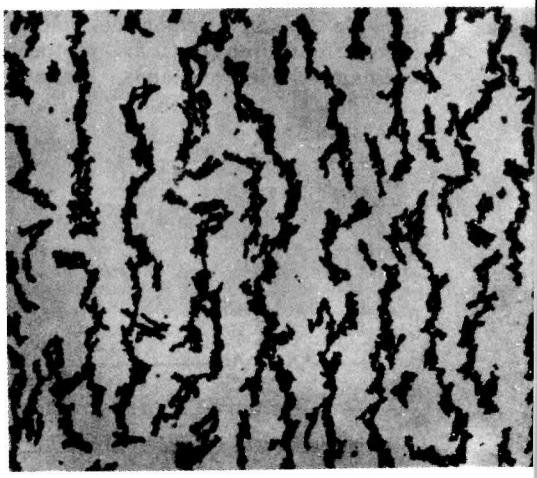


Polvillo de hierro en suspensión en el aceite magnético, visto al microscopio.

Fluidos magnéticos

Si se mezclan limaduras de hierro muy finas (de menos de 20 micrones de diámetro) con aceite, se puede realizar la experiencia de la figura, donde se ve cómo un imán levanta una cierta cantidad de aceite con limaduras. La viscosidad de un fluido magnético se puede hacer variar aplicando un campo magnético; cuando éste es nulo, el fluido tiene su viscosidad normal; a medida que se aumenta la intensidad del campo, el líquido se va "solidificando", pudiendo llegar a perder toda fluidez. Esto se aprecia en las figuras; cuando por la bobina que rodea al recipiente con aceite no circula corriente, el líquido es como un aceite común; en la segunda figura de página anterior, el líquido se ha "solidificado" al circular corriente por la bobina. Este principio se aplica en la fabricación de válvulas magnéticas. Devanando una bobina alrededor del tubo que conduce el fluido magnético y controlando la intensidad de la corriente que pasa por la bobina, se puede regular con toda precisión el paso del fluido por un conducto.

El mismo polvillo, cuando se ha establecido un campo magnético.



Los fluidos magnéticos se aplican también en un nuevo modelo de amortiguador para automotores. El amortiguador corriente consiste esencialmente en un ém-

bolo que se mueve dentro de un cilindro lleno de líquido, en el cual la viscosidad de éste resiste el movimiento del émbolo; generalmente, la velocidad del émbolo se controla mecánicamente, mediante un orificio variable practicado en el émbolo o en las paredes del cilindro, sistema que presenta varios inconvenientes. En el nuevo modelo se usa un fluido magnético, cuya viscosidad variable regula la velocidad del émbolo. Para la variación de la viscosidad se devana una bobina sobre el amortiguador.

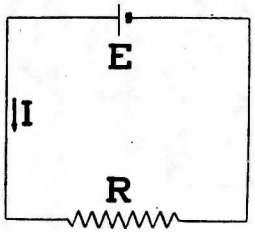
Circuitos magnéticos

En la construcción de máquinas electromagnéticas –motores, dínamos, electroimanes, aparatos de medida, etc.– se presentan siempre problemas como éstos: ¿qué intensidad de corriente se necesita para generar un flujo de tantos Mx?; ¿qué bobinado (número de espiras) habrá que emplear si se dispone de una intensidad determinada?; ¿qué longitud, qué sección, qué sustancia habrá que emplear; qué disposición general habrá que dar al conjunto, para obtener el mejor rendimiento?; etc. La mayoría de estos problemas pueden resolverse con cierta facilidad, gracias a una ingeniosa idea debida a Hopkinson, físico inglés. Su razonamiento fue el siguiente: el flujo a través de un solenoide de permeabilidad μ vale

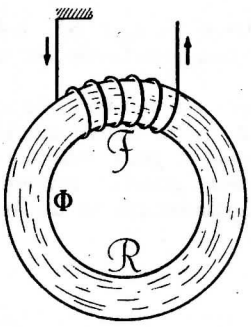
$$\Phi = \mu \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} \cdot S,$$

pero si esta fórmula se escribe así:

$$\Phi = \frac{\frac{4\pi}{10} NI}{\frac{1}{\mu} \frac{l}{s}},$$



Ley de Hopkinson y ley de Ohm.



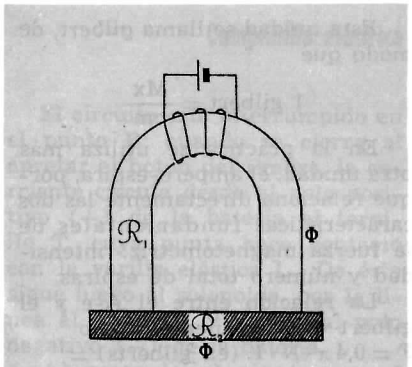
Φ es directamente proporcional al producto $\frac{4\pi}{10} NI$ (que desde ahora llamaremos F) e inversamente proporcional a $\frac{1}{\mu} \frac{l}{s}$, que llamaremos R. Fue justamente R lo que llamó la atención de Hopkinson, pues recordando que la resistencia eléctrica de un conductor vale $R = \varrho \frac{l}{s}$, él pensó que era posible considerar al solenoide como un *circuito magnético*, en el que, en lugar de circular una corriente eléctrica, "circulan" líneas de fuerza magnética. Entonces Φ desempeñaría un papel análogo al de la intensidad de la corriente en un

circuito eléctrico, y R el de una resistencia magnética (por eso se la llama *reluctancia*). ¿Qué papel asignarle a F? Pues el de una fuerza magnetomotriz causante de la circulación del flujo Φ a través de un circuito de reluctancia R, de la misma manera que la fuerza electromotriz en un circuito eléctrico es la causante de la circulación de la intensidad I a través de una cierta resistencia R. Por lo tanto, Hopkinson escribió que

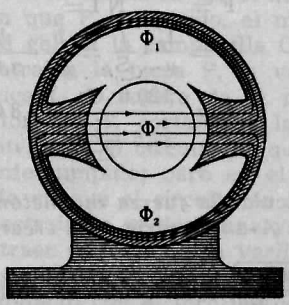
$$\Phi = \frac{F}{R},$$

es decir: en un circuito magnético, el flujo es directamente proporcional a la fuerza magnetomotriz F, e inversamente proporcional a la reluctancia magnética R. Recuérdese el enunciado de la ley de Ohm, y se comprenderá por qué a la ley de Hopkinson se la suele llamar *ley de Ohm de los circuitos magnéticos.*

Hopkinson llevó hasta sus últimas consecuencias esta comparación entre circuitos eléctricos y magnéticos, y probó que existen *circuitos magnéticos serie*, donde la reluctancia total es igual a la suma de las reluctancias; *circuitos paralelos*, con una reluctancia equivalente tal que su inversa es igual a la suma de las inversas de las reluctancias, etc. En general, la "receta" es la siguiente: un circuito magnético se estudia planteando su análogo eléctrico. El método que se siga para resolver éste, permitirá resolver el circuito magnético.



Ejemplo de circuito magnético serie.



Ejemplo de circuito magnético paralelo.

Unidades

Sabemos que el flujo se mide en maxwells. En cuanto a la reluctancia, en la fórmula $R = \frac{1}{\mu}\frac{l}{S}$, l se mide generalmente en centímetros y S en centímetros cuadrados. La unidad de reluctancia no tiene nombre especial. Para la fuerza magnetomotriz, la unidad que resulta de la fórmula de Hopkinson es

$$F = \Phi \cdot R \therefore 1 \text{ u. de } F = 1 \text{ Mx} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{Mx}}{\text{cm}}$$

Esta unidad se llama *gilbert*, de modo que

$$1 \text{ gilbert} = \frac{\text{Mx}}{\text{cm}}$$

En la práctica se utiliza más otra unidad, el ampere-espira, porque relaciona directamente las dos características fundamentales de la fuerza magnetomotriz: intensidad y número total de espiras.

La relación entre el A-e y el gilbert es la siguiente: como

$$F = 0{,}4\,\pi \cdot N \cdot I \text{ (en gilberts)} = N \cdot I \text{ (en A-e)}$$

de modo que

$$0{,}4\,\pi\,\text{G} = 1\,\text{A-e} \quad \text{o} \quad 1{,}256\,\text{G} = 1\,\text{A-e}$$

EJEMPLOS: *Calcular el flujo magnético que atraviesa un solenoide con núcleo de aire, de 100 cm de longitud, 2 cm de diámetro y 400 espiras, por el que circula una corriente I = 0,24 A. Calcular también la fuerza magnetomotriz en gilberts y en A-e, y la reluctancia del circuito.*

$$\Phi = \frac{F}{R}$$

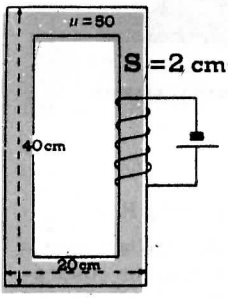
$$F = 0{,}4\,\pi\,N\,I = 0{,}4\,\pi \cdot 400 \cdot 0{,}24\,\text{G} \cong 120{,}6\,\text{G}$$

$$F = N\,I = 400\,\text{e} \cdot 0{,}24\,\text{A} \cong 96\,\text{A-e}$$

$$R = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{\pi r^2} = \frac{1}{1} \cdot \frac{100\,\text{cm}}{3{,}14 \cdot 1\,\text{cm}^2} \cong 31{,}5\,\frac{1}{\text{cm}}$$

$$\Phi = \frac{120{,}6\ \text{G}}{31{,}5\ \frac{1}{\text{cm}}} \cong 3{,}8\,\text{G} \cdot \text{cm} = 3{,}8\,\text{Mx}$$

Calcular la fuerza magnetomotriz en A-e necesaria para crear en el circuito de la figura un flujo de 10 000 Mx.

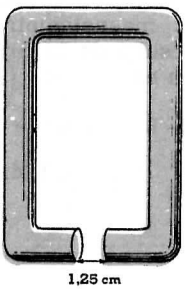


$$F = \Phi \cdot R$$

$$R = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{50} \cdot \frac{120}{2} = 1{,}2\,\frac{1}{\text{cm}}$$

$$\therefore\ F = 10\,000\,\text{Mx} \cdot 1{,}2\,\frac{1}{\text{cm}} = 12\,000 \text{ gilberts}$$

$$F = 12\,000\,\text{G} = \frac{12\,000}{1{,}256}\,\text{A-e} \cong 9\,554 \cdot \text{A-e}$$



Calcular la reluctancia del entrehierro de la figura, sabiendo que es de 2 cm de radio y que mide 1,25 cm de largo. ¿Cómo varía esa reluctancia, si el entrehierro se llena de una sustancia de permeabilidad μ = 100?

$$R_{m1} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{\mu} \text{ ; como } \mu = 1,$$

$$l = 1{,}25 \text{ cm } S = 12{,}56 \text{ cm}^2$$

$$R_{m1} = \frac{1}{1} \cdot \frac{1{,}25 \text{ cm}}{12{,}56 \text{ cm}^2} = 0{,}1 \frac{1}{\text{cm}}$$

$$R_{m2} = \frac{1}{100} \cdot \frac{1{,}25}{12{,}56} = 0{,}001 \frac{1}{\text{cm}}$$

Una permeabilidad 100 veces mayor, *disminuye* 100 veces el valor de la reluctancia.

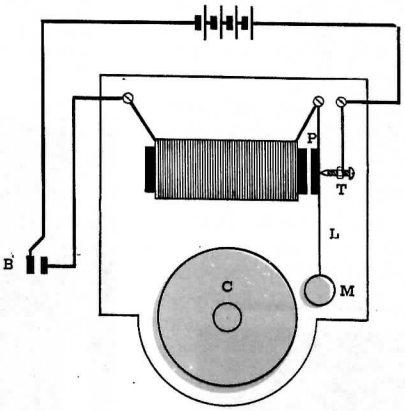
Aplicaciones del efecto Oersted

El efecto Oersted es uno de los más importantes factores en el progreso de la industria y también contribuye al mejoramiento del nivel de vida. En las fundiciones de hierro, toneladas de chatarra son llevadas hasta los hornos por medio de poderosos electroimanes; otros, muy pequeños, hacen vibrar las chapas delgadas de los auriculares telefónicos; el timbre eléctrico, los motores eléctricos, bombas de aceite en motores de automóviles, interruptores automáticos de corriente eléctrica, en máquinas de lavar, etc., constituyen algunas de las innumerables aplicaciones de los electroimanes. Veamos algunos de los aparatos más difundidos.

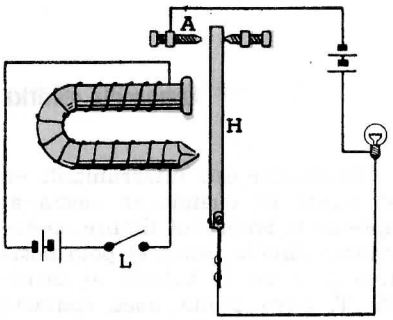
Campanilla eléctrica

El circuito está interrumpido en el punto B; cuando se cierra al apretar el botón del timbre, la corriente circula desde el polo positivo (+) de la batería al tornillo T, cuya punta hace contacto con la varilla elástica L. De ésta sigue luego al solenoide, por la línea al punto B, y de ahí al polo negativo (—) de la batería.

Al pasar la corriente por el electroimán, éste atrae a la pieza P, que es de hierro dulce y está unida a la varilla L. En el instante en que P es atraído, el martillo M golpea la campanilla C. Al ser atraída la pieza P, la varilla elástica L se separa de la punta del tornillo T, cortándose la corriente, pues el circuito ha quedado interrumpido; pero en el momento en que el circuito se corta, el electroimán se desimana y deja de atraer la pieza P; la varilla L, por ser elástica, vuelve a ponerse en contacto con el tornillo, con lo



Esquema de una campanilla eléctrica.



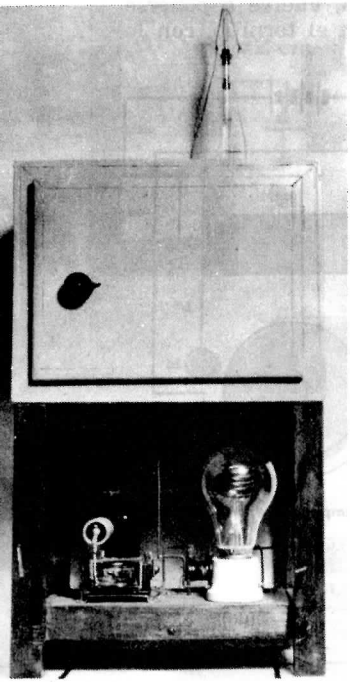
Esquema de un relais que puede construirse fácilmente.

cual la corriente circula otra vez. Nuevamente el imán atrae al martillo y otra vez la corriente se interrumpe; el fenómeno se repite mientras se tiene apretado el botón B.

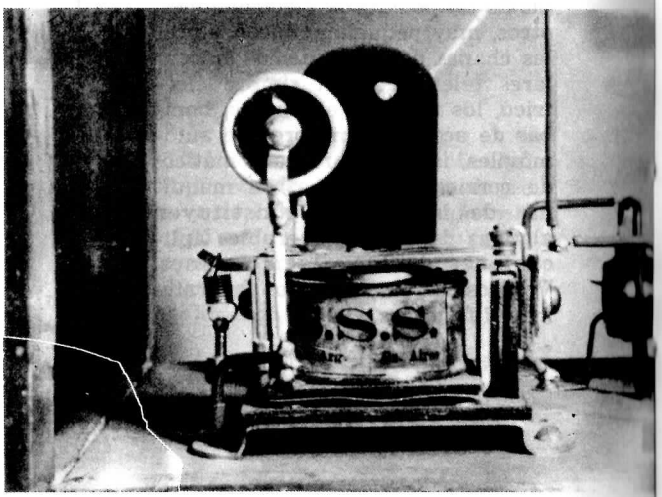
Actualmente las campanillas o timbres eléctricos se conectan directamente a la línea mediante un transformador que reduce la tensión de 220 volts a la tensión requerida por el timbre (6 a 12 volts) eliminándose la batería.

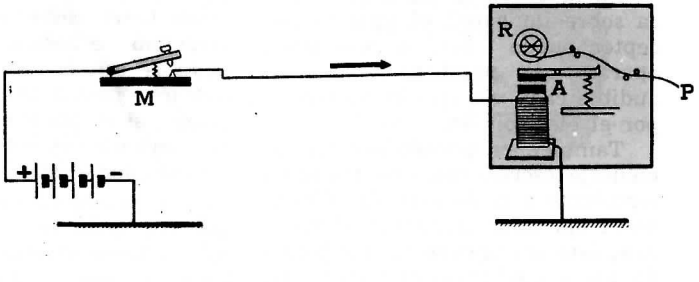
Relais o relevadores

Una de las aplicaciones más difundidas de los electroimanes son los *relais*. Reciben este nombre ciertos mecanismos electromagnéticos que sirven para abrir o cerrar un circuito eléctrico. En otras palabras: son llaves que en lugar de ser movidas a mano, lo son electromagnéticamente, y por lo tanto, pueden manejarse a distancia. El esquema de la figura muestra cómo actúa un sencillo relais "casero": al cerrar en L el circuito del relais, el electroimán –construido con un clavo doblado en forma de U y alrededor del cual se han arrollado unas 50 vueltas de alambre de cobre aislado– atrae la laminilla H, de hierro dulce; ésta toca con el contacto A, y entonces se cierra el circuito de la lamparita, que se enciende. Si se



Horno provisto de relais. En su parte superior, un cable del circuito del relais se introduce en un tubo con mercurio, sin sumergirse. Si la temperatura del horno crece, sube el mercurio hasta tocar el cable y cierra el circuito; actúa entonces el electroimán S.S.S. atrayendo la palanca horizontal e interrumpe el circuito de calefacción. Cuando la temperatura disminuye baja el mercurio e interrumpe el circuito del relais; éste deja de atraer la palanca que restablece el contacto en el circuito de calefacción.





Esquema de transmisor y receptor telegráfico.

abre la llave L, el electroimán deja de actuar, la laminilla vuelve a su posición inicial y el circuito de la lamparita se interrumpe, con lo cual la misma se apaga. Como se ve, hemos actuado "a distancia" sobre la lamparita, mediante la acción electromagnética del relais.

Los relais se emplean en muchísimas instalaciones, especialmente de control y alarma, y en los circuitos telegráficos y telefónicos, como estación de refuerzo.

Telégrafo

En realidad, la invención del telégrafo no se puede atribuir a una sola persona, si bien fue Samuel Morse, un pintor norteamericano, quien le dio forma práctica e hizo posible su utilización para las comunicaciones públicas. Siete años después de haber inventado Morse su aparato fue inaugurada la primera línea telegráfica que unía a Wáshington con Baltimore, y tenía una longitud de 64 kilómetros.

El telégrafo de Morse, en su forma más sencilla, consta de un aparato transmisor, un aparato receptor y la línea que los une, constituida por un solo hilo, pues el retorno se realiza por tierra.

En la estación transmisora, el polo positivo (+) de la batería está unido al manipulador M, y el polo negativo (—) con tierra (T). Al pulsar el manipulador, la corriente pasa a la línea, llega a la estación receptora, y, luego de recorrer el solenoide de un electroimán, pasa a tierra.

Al pasar la corriente, el electroimán –actuando como un relais– atrae un extremo de la palanquita, que gira alrededor del punto A. La punta del otro extremo presiona una cinta de papel P, deslizada por un mecanismo de relojería R. La marca dejada por dicha punta especialmente entintada, será un punto o una raya, según el tiempo que se mantenga oprimido el manipulador.

Utilizando el alfabeto Morse, que es una combinación convencional de puntos y rayas, se puede transmitir cualquier palabra. En la palabra Argentina, por ejemplo, hay que transmitir los puntos y rayas que siguen:

.— .—. ——. . —. — .. —. .—
A R G E N T I N A

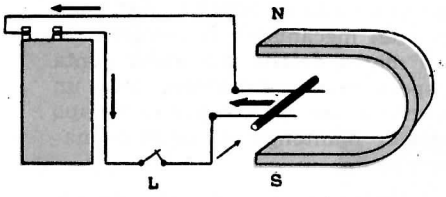
En lugar de un lápiz que marca sobre un papel, el aparato receptor puede tener un resonador, aparato que produce una señal audible cada vez que es accionado por el electroimán.

También es posible obtener el mensaje escrito con una máquina semejante a la de escribir. Cuando el operador transmite el mensaje, éste se imprime en una banda de papel mediante un teclado, en tipos de imprenta, y si se desea, en varias estaciones receptoras al mismo tiempo.

Fuerza de un campo magnético sobre un conductor

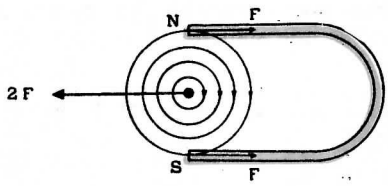
En la experiencia de Oersted, la corriente circula por un alambre fijo y la aguja magnética es móvil.

Imaginemos ahora lo inverso: un imán fijo y una corriente que circula por un alambre móvil.



Conductor móvil en un campo magnético.

Esquema de las fuerzas.



¿Qué pasa? Si la corriente ejerce cierta fuerza sobre el imán, por el principio de acción y reacción *el imán reacciona sobre la corriente con una fuerza igual y contraria.* Luego, si el alambre que conduce la corriente no está sujeto, será movido por el campo magnético.

Esto puede comprobarse con un potente imán en herradura, una pila y unos alambres gruesos, de cobre o bronce, bien limpios para que los contactos sean buenos. Cerrando la llave L, pasa la corriente producida por la pila y se observa que el trozo de alambre móvil se corre hacia afuera del imán sobre los dos alambres que sirven de rieles.

En el esquema puede verse la explicación del fenómeno: al trozo móvil del conductor se lo ve en sección, pues ahora imaginamos acostado al imán y el trozo móvil estaría perpendicular al papel. El campo magnético que produce la corriente es, como sabemos, un campo formado por líneas circulares; si la corriente pasa en el papel de arriba para abajo, por la regla del tirabuzón sabemos que las líneas tienen el sentido que indican las flechas.

Pero sabemos que un polo N trata de recorrer las líneas de fuerza en el sentido marcado por las flechas. Por lo tanto, el polo N del imán sufrirá una fuerza F hacia la derecha.

En cambio, un polo S trata siempre de ir en contra de las líneas de fuerza. Por lo tanto, el polo S del imán será rechazado hacia la derecha con una fuerza F (igual a la que rechaza al polo N, puesto que los dos polos magnéticos tienen la misma magnitud, por

pertenecer al mismo imán). Pero como el imán es pesado, no puede ser movido. En cambio, por el principio de acción y reacción, el imán reacciona sobre el trozo móvil del conductor con una fuerza igual y contraria. Por lo tanto, el conductor es rechazado hacia afuera.

Si se invierte el sentido de la corriente se invierte el sentido de la fuerza; y lo mismo ocurre si se invierten los polos del imán. La siguiente regla permitirá determinar siempre el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor, conociendo el sentido de I y el de H.

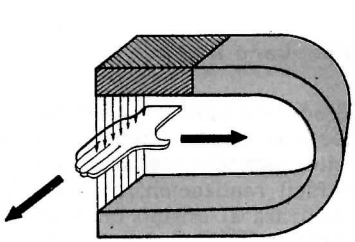
Regla de la palma de la mano izquierda

Se coloca la mano izquierda de modo que las líneas de fuerza de H perforen la palma, y que la corriente entre por la muñeca y salga por la punta de los dedos. Entonces el pulgar indica el sentido de la F.

En cuanto a la intensidad, se puede calcular por la ley de Laplace

$$F = \frac{1}{10} \mu H I l \operatorname{sen} \alpha$$

–que no nos es posible demostrar aquí–, siendo μ la permeabilidad del medio donde está sumergido el conductor, l la longitud del trozo de conductor sobre el que actúa el campo, y α el ángulo que forma el conductor con la dirección del campo. Obsérvese que si $\alpha = 0$,



Regla de la palma de la mano izquierda; si la palma recibe las líneas magnéticas de fuerza y los dedos señalan el sentido de la corriente, el pulgar extendido indica el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor.

$\operatorname{sen} \alpha = 0$, por lo cual $F = 0$. Es decir: *si un conductor está situado paralelamente al campo, no actúa sobre él ninguna fuerza.* Por lo contrario, la fuerza es máxima cuando el conductor está situado perpendicularmente al campo, pues entonces $\alpha = 90°$, $\operatorname{sen} \alpha = 1$ y

$$F = \frac{1}{10} \mu H I l$$

Aquí volvemos a encontrar la permeabilidad multiplicando un efecto magnético. No debe extrañarnos, entonces, que en todas las máquinas los bobinados se hagan sobre núcleos de permeabilidad magnética elevada.

EJEMPLO: *Un conductor rectilíneo de 20 cm está colocado normalmente en un campo magnético de 5 000 Oe. ¿Qué fuerza actúa sobre él cuando es recorrido por una corriente de 5 A?*

$$F = \frac{1}{10} \mu H I l \operatorname{sen} \alpha$$

Como $\alpha = 90°$, $\operatorname{sen} \alpha = 1$; además $\mu = 1$; por lo tanto

$$F = \frac{1}{10} \cdot 5\,000 \text{ Oe} \cdot 5 \text{ A} \cdot 20 \text{ cm}$$

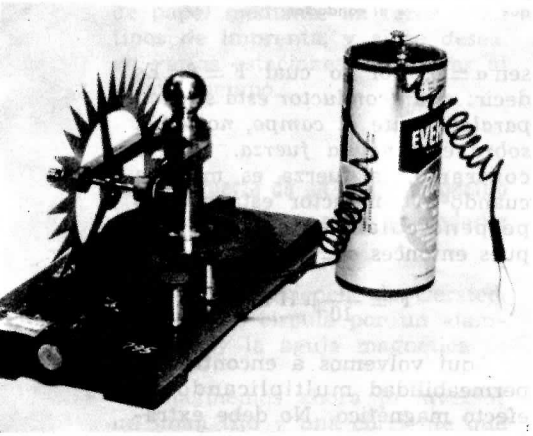
$$F = 50\,000 \text{ dyn}$$

Un pequeño motor

Podemos aplicar la ley de Laplace a la construcción de un motorcito llamado *rueda de Barlow* –de fácil realización, para lo cual se utilizará el mismo imán en herradura de la experiencia anterior. El disco es metálico (conviene aluminio), y en la cubeta hay mercurio. Al cerrar la llave se observará que la rueda comienza a girar con bastante velocidad.

La regla de la palma de la mano izquierda permite determinar cuál es el sentido de F y por lo tanto, de la rotación.

La rueda de Barlow es un motor eléctrico, pues en ella se *transforma energía eléctrica en mecánica.* Por lo tanto, también puede funcionar como dínamo; basta para ello desconectar los conductores de la pila, cerrar el circuito y hacer girar la rueda, con la mano o mediante un manubrio adecuado. Para revelar el paso de la corriente, bastará colocar una aguja magnética, a manera de galvanoscopio rudimentario.



Una rueda de Barlow con el circuito abierto (arriba). La punta de un diente toca el mercurio de un recipiente colocado entre los polos de un imán. Al conectar el cable (abajo) la corriente pasa del diente al mercurio (o viceversa) y la fuerza que actúa sobre la rueda (ver esquemas de página 392) lo pone en movimiento.

Instrumentos de medición

Veremos ahora cómo son los galvanómetros, en qué principio se basan y cómo puede transformárselos en amperímetros y voltímetros.

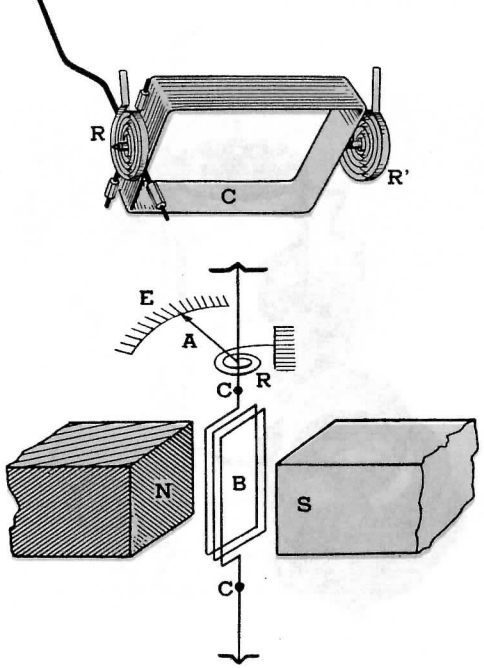
Los tipos más importantes de galvanómetros son:

Galvanómetros de bobina móvil o de D'Arsonval

Cuando un cuadro bobinado B está en un campo magnético, y por él circula una corriente, gira a impulsos de una cupla, que lleva al cuadro a una posición normal a la recta que une los polos NS del imán permanente. Ésta resulta así una obligada posición final de la bobina, cualquiera sea la intensidad de la corriente. Para superar

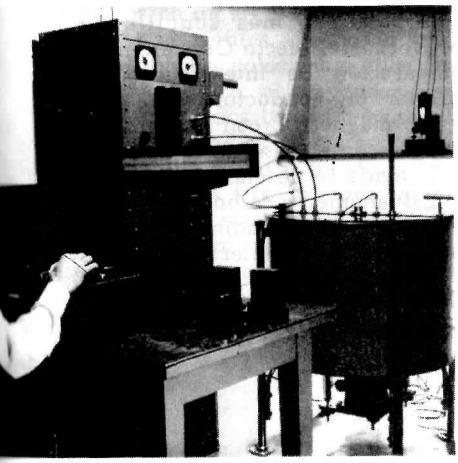
este inconveniente y poder comparar intensidades diferentes, se agrega un resorte R, en forma de espiral, uno de cuyos extremos se fija al eje de rotación C-C. Al girar la bobina, el resorte se deforma, oponiéndose al movimiento y tratando de llevar la bobina a la posición inicial (por eso este resorte se llama *antagónico*). El instrumento funciona ahora así: al circular por la bobina la corriente cuya intensidad se quiere medir, se produce la cupla electromagnética; la bobina comienza a moverse y el resorte a deformarse, hasta que la cupla elástica del resorte equilibra a la cupla electromagnética. La bobina móvil queda en esa posición, bien determinada y distinta para cada intensidad de corriente. Generalmente, los aparatos llevan dos resortes antagónicos en lugar de uno, para mejorar el sistema.

La rotación de la bobina se mide mediante una aguja A, solidaria con el eje de rotación, y cuyo extremo se mueve sobre una escala graduada E. Como la desviación angular es proporcional a la intensidad de la corriente —según la fórmula del apartado anterior— las divisiones de la escala de este instrumento son equidistantes.

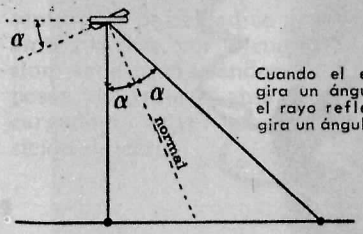


Arriba): Cuadro móvil (C), resortes antagónicos (R y R') y aguja (A) de un galvanómetro de D'Arsonval. Abajo): Esquema de un galvanómetro de bobina móvil.

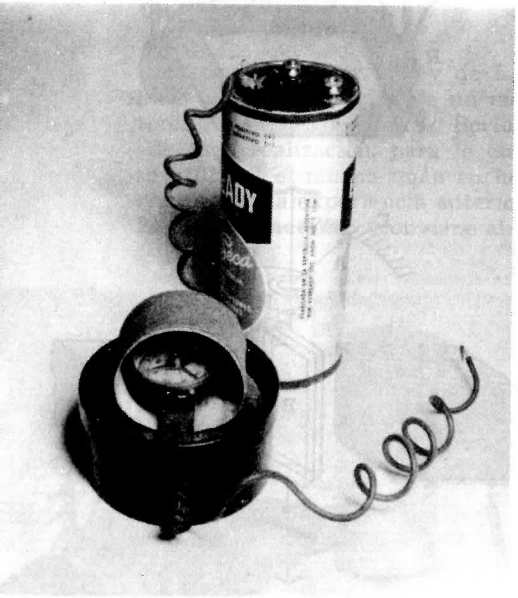
Con estos instrumentos se pueden medir intensidades del orden del microampere. Para aumentar la sensibilidad se suspende la bobina móvil de un hilo de sección muy pequeño (milésimo de milí-



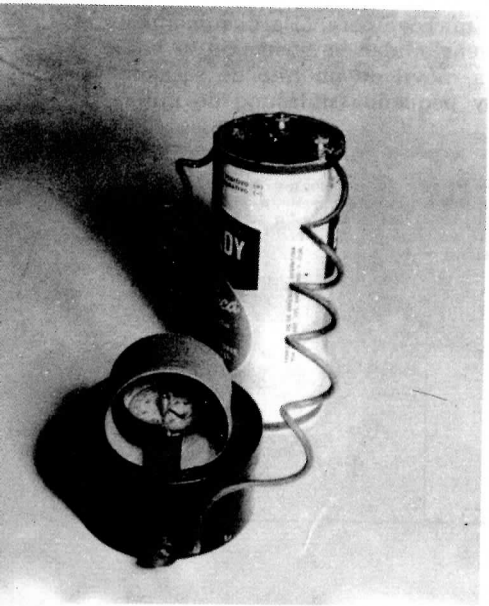
Cómo se trabaja con un galvanómetro de espejo; éste está sobre el estante de la pared del fondo; obsérvese cómo brilla su espejito y cómo se proyecta sobre la escala el rayo de luz reflejado en él.



Cuando el espejo gira un ángulo α, el rayo reflejado gira un ángulo 2 α.



Un galvanómetro rudimentario de imán móvil. Arriba): Con el circuito abierto, la aguja se orienta en la dirección N-S. Abajo): Con el circuito cerrado, la aguja se coloca paralelamente al eje de la bobina.



metro cuadrado) y la torsión propia del hilo hace las veces de resorte antagónico. Pero en estas condiciones, una corriente de 10^{-9} ampere produce una rotación tan pequeña de la bobina, que deberían usarse agujas de casi 1 m de longitud; como el peso sería excesivo se las reemplaza por un rayo luminoso que incide sobre un espejito. La lectura se hace entonces sobre una regla, generalmente dividida en milímetros. Para medir intensidades sólo se requiere conocer la constante de la escala, es decir, determinar a qué intensidad de corriente corresponde una desviación de 1 mm en la regla. Para ello se hace circular por la bobina una intensidad de corriente conocida y se lee en la regla el número de divisiones correspondiente. El cociente de ambos valores da el de la constante.

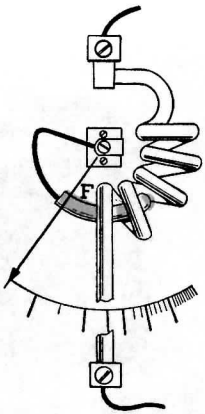
Este tipo de galvanómetro sólo sirve para corriente continua: al invertir el sentido de la corriente se invierte el sentido de rotación; si ello se produce muchas veces por segundo, la inercia propia de la bobina hace que ésta quede inmóvil.

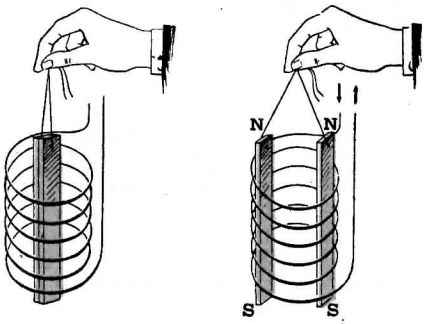
Galvanómetro de imán móvil

La manera más sencilla de aprovechar el efecto Oersted en la comparación de intensidades, es enrollar un conductor sobre una aguja magnética con un resorte antagónico: al paso de la corriente, la aguja se desvía. Se tiene así un galvanómetro de *bobina fija*.

Otro modelo rudimentario de galvanómetro de hierro móvil es el llamado de *succión*, en el que

Galvanómetro de succión, de imán móvil; al circular la corriente por el solenoide, el trocito de hierro dulce F es atraído, y la aguja solidaria se mueve con él. Puede hacerse uno "casero" construyendo el solenoide con 50 vueltas de alambre de cobre aislado de 0,8 mm de diámetro, bobinadas sobre un carretel de hilo; para aumentar la atracción conviene colocar en el carretel un pequeño núcleo de hierro dulce. Hay que tratar de hacer una buena suspensión del trocito de hierro dulce que ha de ser succionado.

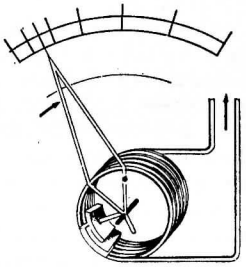




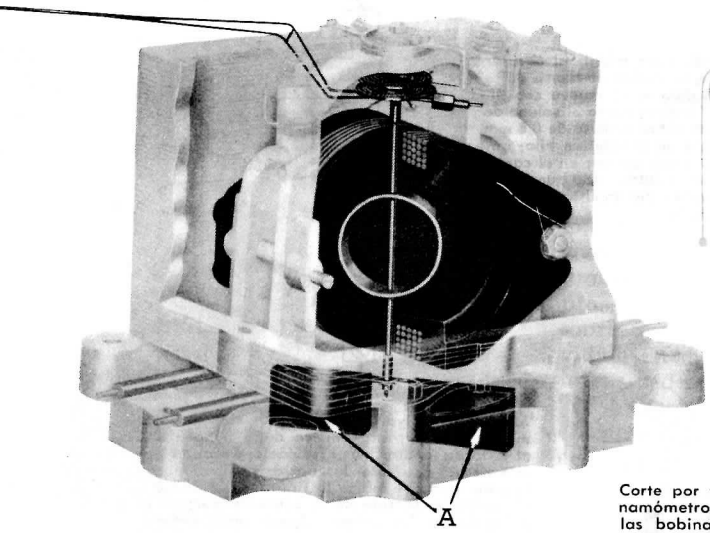
Idea de un galvanómetro de repulsión de imán móvil: dos barras de hierro dulce penden una al lado de la otra en un solenoide; cuando por éste circula corriente, las barras se imanan con la polaridad que indica la figura y se rechazan; si cambia el sentido de la corriente, cambia la polaridad y las barras siguen rechazándose. Por lo tanto, este instrumento puede emplearse con CC y con CA.

un trocito de hierro dulce es "chupado" por el solenoide cuando circula corriente por éste. No hay resorte, pues lo vuelve a la posición inicial el propio peso del trocito de hierro. Sólo sirve para corriente continua.

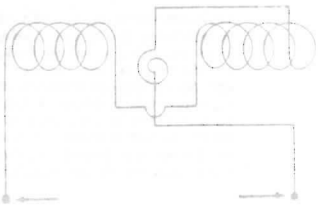
Mucho mejores son los de repulsión, tan empleados como los de bobina móvil, y que sirven para ambas corrientes. Se basan en la repulsión de polos magnéticos del mismo nombre: al suspender frente a frente dos barras magnetizadas, como indica la figura, se rechazan. En el instrumento, una de las barras es fija, mientras que la otra pivotea sobre la primera y gira cuando ambas son magnetizadas por la corriente que pasa por la bobina. Si la corriente invierte su sentido, la polaridad se invierte en ambas barras, por lo cual la repulsión sigue produciéndose. También posee un resorte antagónico, encargado de volver la aguja a la posición de cero.



Esquema de un galvanómetro de repulsión. Dentro de la bobina, y adherida a ella, hay un trozo de hierro dulce; frente a él hay otro trozo semejante, que puede girar alrededor del eje de la aguja. Al pasar corriente por la bobina, el segundo trozo gira y provoca el desplazamiento de la aguja.



Corte por transparencia de un electrodinamómetro: obsérvese la disposición de las bobinas que giran al repelerse o atraerse; las aletas **A** son de aluminio y actúan como "freno magnético".

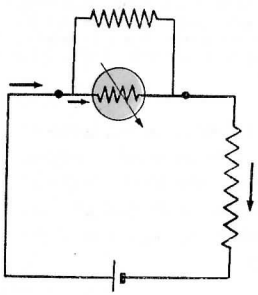


Esquema de funcionamiento de un electrodinamómetro.

Electrodinamómetros

Dos solenoides colocados frente a frente se atraen o rechazan según su polaridad; o bien si pueden girar alrededor de un eje, girarán un ángulo cuya magnitud dependerá de la intensidad de la corriente que circula por ellos.

Agregando una aguja a la bobina móvil, y construyendo una escala, se tiene un aparato para medir la intensidad de una corriente. Éste es el fundamento de los llamados electrodinamómetros. Sirven para ambas corrientes, y como carecen de núcleo metálico, los fenómenos magnéticos como la histéresis no los afectan.



Cómo se agrega un "shunt" para tener un amperímetro.

Amperímetros

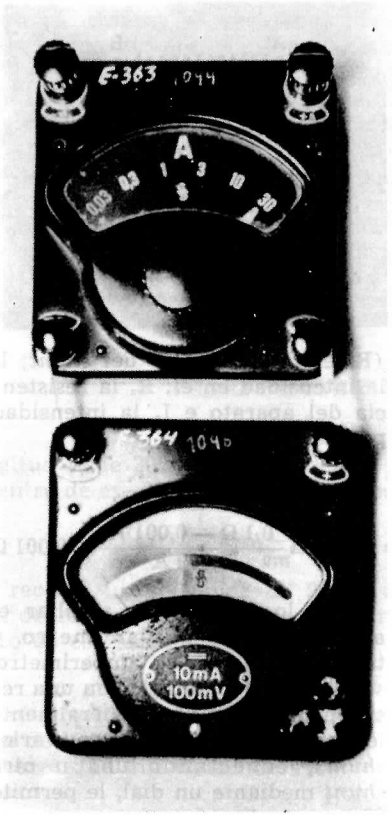
Prácticamente, el galvanómetro, el amperímetro y el voltímetro son instrumentos iguales. En esencia, sólo difieren en que una resistencia adicional hace que un galvanómetro pueda destinarse a medir intensidades más bien grandes, o a medir diferencias de potencial.

Supongamos que la máxima intensidad que puede medir un galvanómetro cuya resistencia interna vale 0,1 Ω es de 0,001 mA. ¿Cómo puede hacerse para que pueda medir intensidades de hasta 1 A?

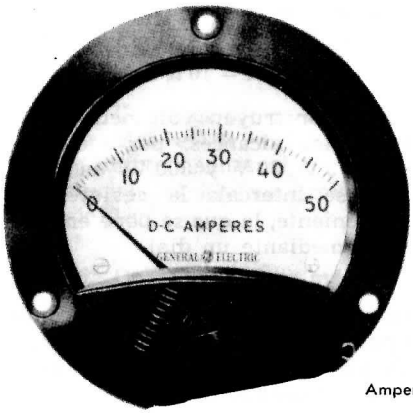
La solución está en el esquema: para que la corriente de 1 A que circula por el circuito no pase toda por el aparato, pues éste no la puede soportar y se quemaría, se conecta una resistencia en derivación. Naturalmente que esta resistencia debe estar calculada de modo que si la corriente alcanza un máximo de 1 A, por la resistencia pasen por lo menos 0,999 A y sólo 0,001 A por el aparato de medición. En esas condiciones, el galvanómetro se transforma en amperímetro.

¿Cuánto debe valer la resistencia del ejemplo anterior, a la que se llama *shunt*, que en inglés quiere decir "derivación"? De acuerdo con la ley de las corrientes derivadas, entre los puntos señalados en el circuito de página 398 la diferencia de potencial es

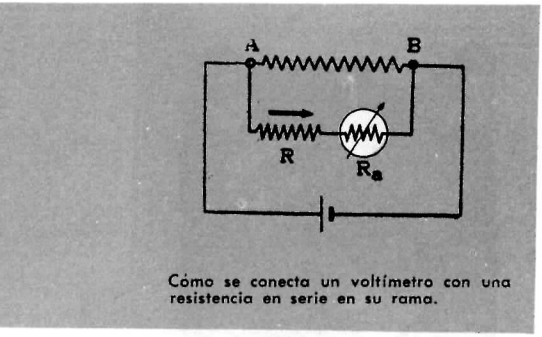
$$V_{AB} = R_s I_s = R_a I_a$$



El aparato de la parte inferior puede emplearse como amperímetro o como voltímetro; en el primer caso puede medir hasta 0,10 mA, y en el segundo hasta 100 mV (de acuerdo con la inscripción que puede leerse). El aparato de la parte superior es un conjunto de "shunts" que pueden conectarse independientemente con sólo mover el dial. Con ellos el amperímetro puede medir hasta 0,03 A, 0,3 A, 1 A, 10 A y 30 A, respectivamente, como indica la escala superior.



Amperímetro de corriente continua.



Cómo se conecta un voltímetro con una resistencia en serie en su rama.

(R_s es la resistencia del *shunt*; I_s la intensidad en él; R_a la resistencia del aparato e I_a la intensidad por él).

$$\therefore\ R_s = \frac{R_a I_a}{I_s} =$$

$$= \frac{0{,}1\ \Omega - 0{,}001\ A}{0{,}999\ A} = 0{,}001\ \Omega$$

Por lo tanto, para ampliar el alcance de un galvanómetro y transformarlo en un amperímetro, sólo hay que *shuntarlo* con una resistencia adecuada. Generalmente los amperímetros tienen varios *shunts*; conectando uno u otro *shunt* mediante un dial, le permite variar su alcance.

El amperímetro se conecta en serie en el circuito.

Voltímetros

El voltímetro es un aparato del mismo tipo que el galvanómetro y el amperímetro, destinado a medir diferencias de potencial. Así como un galvanómetro se puede transformar en amperímetro con un *shunt*, un amperímetro se puede transformar en voltímetro con sólo agregarle una resistencia en serie. Supongamos, por ejemplo un amperímetro cuya resistencia interna es de 10 Ω y cuyo alcance máximo es de 2 A. Para transformarlo en un voltímetro que mida hasta 200 V, se lo debe colocar en derivación en el circuito; en la rama donde está conectado el voltímetro debe intercalarse, en serie con él, una resistencia adecuada.

La máxima tensión que puede soportar el aparato de nuestro ejemplo es:

$$V = I \cdot R_a = 2\ A \cdot 10\ \Omega = 20\ V$$

Como se quiere que el aparato mida una diferencia de potencial de 220 V, hay que colocar, en serie con él, una resistencia de un valor tal que en ella se produzca una caída de 200 V, de modo que en el voltímetro haya una caída de 20 V. ¿Cuánto debe valer la resistencia que se intercala? Como por la rama del voltímetro la máxima intensidad que puede circular es de 2 A, la caída de potencial en ella será:

$$V_A - V_B = I\,(R_a + R)\ \ \therefore\ R =$$

$$= \frac{V_A - V_B}{I} - R_a = \frac{220\ V}{2\ A} - 10\ \Omega$$

$$R = 110\ \Omega - 10\ \Omega = 100\ \Omega$$

Se construyen voltímetros para varios alcances, por ejemplo, hasta 3 V, 30 V y 300 V: en cada caso se intercala la resistencia conveniente, la que se pone en circuito mediante un dial.

Se comprende, además, que un mismo aparato puede servir como amperímetro y voltímetro, bastando para ello conectarlo adecuadamente y usando *shunts*.

Por último, si se va a utilizar un voltímetro o un amperímetro, recuérdese:

1) Conectar los instrumentos de acuerdo con la polaridad. Si se conectan al revés, la aguja girará en sentido contrario, y al forzarse puede doblarse y hasta romperse.

2) Si se trabaja con un instrumento de varios alcances, siempre debe comenzarse trabajando con el máximo alcance, ajustándose después la escala.

3) Nunca debe conectarse un amperímetro en derivación. Debido a su pequeña resistencia interna, al conectarlo así se lo pone prácticamente en cortocircuito, y lo más probable es que la bobina del instrumento se queme.

Problemas

1. Un solenoide de 20 cm de longitud tiene 200 vueltas. Calcular el campo magnético que se crea en el centro de ese solenoide cuando circula una intensidad de 2 A.

R.: $20 \frac{A-e}{cm}$; 25,12 Oe

2. La misma corriente anterior recorre un solenoide de 20 cm de longitud pero formado por dos capas de 100 espiras cada una. ¿Cuánto vale el campo magnético en el centro de ese solenoide?

R.: $20 \frac{A-e}{cm}$

3. Un carretel mide 0,3 cm de radio y 10 cm de largo. Se arrolla sobre él un alambre que mide 120 cm de largo. ¿Qué campo se crea en el centro del solenoide cuando lo recorre una intensidad de 4 A?

R.: $25 \frac{A-e}{cm}$

4. Calcular el flujo que atraviesa un solenoide de 30 esp./cm cuando lo recorre una intensidad de 5 A, sabiendo que el radio de las espiras vale 2 cm.

R.: 2 366,3 Mx

5. Un solenoide de 10 esp./cm es recorrido por una corriente de 10 A. Su núcleo es de un material de permeabilidad $\mu = 1{,}005$. Calcular: *a)* Campo magnético en el centro del solenoide; *b)* Inducción en el material; *c)* Flujo a través del solenoide, suponiendo que su sección mide 2 cm^2.

R.: 126,6 Oe; 12 gauss; 252 Mx

6. Calcular el flujo magnético que atraviesa un solenoide con núcleo de aire, de 200 cm de longitud, 2 cm de diámetro y 400 espiras, por el que circula una corriente $I = 0{,}1$ A. Calcular también la fuerza magnetomotriz y la reluctancia del circuito.

R.: 0,79 Mx; 54,3 b; 63,7 $\frac{1}{cm}$

7. Sobre un anillo, una fuerza magnetomotriz de 1 833,7 gilberts produce un flujo de 183,3 Mx. ¿Cuál es la reluctancia del anillo?

R.: $10 \frac{1}{cm}$

8. ¿Qué intensidad de corriente debe recorrer un circuito magnético de 0,84 unidades de reluctancia para producir un flujo de 6 000 Mx, sabiendo que el solenoide tiene 560 espiras?

R.: 0,72 A

9. ¿Cuál es la fuerza magnetomotriz entre dos puntos de un circuito que distan entre sí 10 cm si el campo magnético entre ellos es constante y vale 20 Oe?

R.: 200 G

10. Un conductor rectilíneo de 10 cm de longitud está colocado normalmente en un campo magnético de 10 000 Oe. ¿Qué intensidad lo recorre si la fuerza que actúa sobre él vale 30 000 dyn?

R.: 3 A

11. ¿Qué fuerza actuará sobre el conductor anterior si la intensidad es de 3 A pero el conductor forma con el campo un ángulo de 30°?

R.: 15 000 dyn

12. Un conductor cilíndrico de 20 cm de longitud se apoya sobre otros dos horizontales, estando aquel recorrido por una intensidad de 10 A. La intensidad del campo terrestre vale 0,25 Oe y la inclinación magnética es de 30°. ¿Qué fuerza es necesario aplicarle horizontalmente para impedir que ruede sobre sus apoyos, despreciando el frotamiento?

R.: 2,5 dyn

13. El cuadro de un galvanómetro mide 5 cm por 6 cm y tiene 100 espiras. El campo magnético de imán vale 240 Oe, y la cupla de torsión del hilo mide 7,2 g-cm/radian. ¿Cuánto se desplazará el índice luminoso sobre una escala situada a 1 metro de distancia cuando en el galvanómetro circula una intensidad de 2 mA?

R.: 2 cm

14. Calcular el shunt para un amperímetro de 2 A de alcance y 0,1 Ω de resistencia interna con el que se desea medir hasta 15 A.

R.: 1/65 Ω

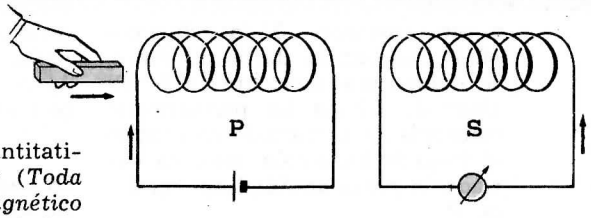
15. La resistencia interna de un voltímetro de 100 V de alcance vale 10 000 Ω. ¿Qué resistencia en serie habrá que agregarle para que mida hasta 200 V?

R.: 10 000 Ω

16. Partiendo de un miliamperímetro de 5 mA de alcance y 0,1 Ω de resistencia interna, se quiere construir un instrumento de múltiples alcances que, como amperímetro, tenga las siguientes escalas: 10 mA; 1 A y 10 A; y como voltímetro 100 mV; 1 V y 10 V. Calcular las respectivas resistencias en paralelo y en serie que deben agregarse.

R.: 0,1Ω; 0,000 5 Ω; 0,000 05 Ω; 19,9 Ω; 199,9 Ω; 1 999,9 Ω

25 EL EFECTO FARADAY Y SUS APLICACIONES



La variación del flujo de inducción es lo que produce la corriente inducida.

Estudiaremos ahora cuantitativamente el efecto Faraday (*Toda variación de un campo magnético produce una corriente eléctrica*) y sus aplicaciones más importantes.

Variación del flujo de inducción, causa de la corriente inducida

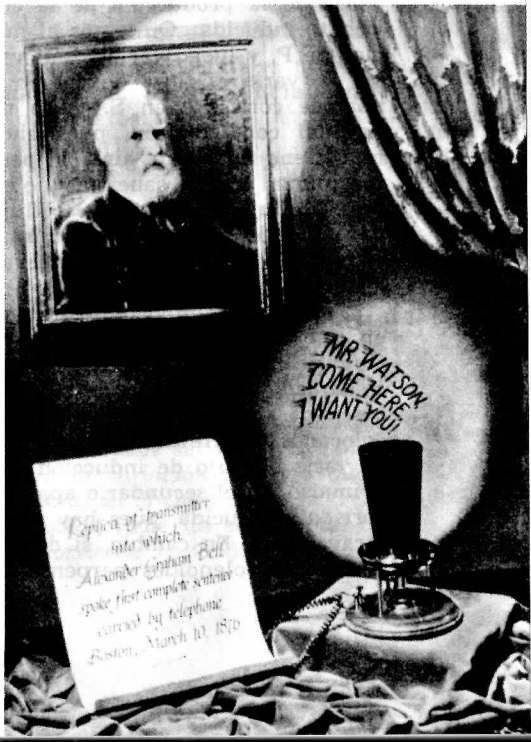
Al referirnos anteriormente al efecto Faraday dijimos que:

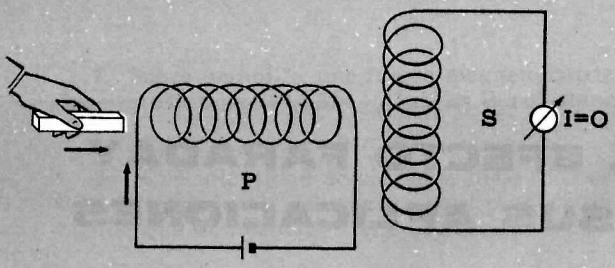
En un circuito se produce una corriente inducida cuando varía el número de líneas de fuerza magnética que lo atraviesan. Sabemos que un conjunto de líneas de fuerza que atraviesa una superficie constituye un flujo magnético, por lo que podemos decir:

En un circuito se produce corriente inducida cuando varía el flujo que lo atraviesa.

Pero hemos distinguido entre flujo de campo y flujo de inducción; ¿cuál de ellos causa la corriente inducida? Una experiencia nos da la respuesta: en la figura, P es el primario y S el secundario. Dejamos constante la intensidad I del primario, con lo cual el campo magnético H, y por lo tanto el flujo de campo, perma-

Réplica del teléfono inventado por Graham Bell, y que funcionó por primera vez el 10 de marzo de 1876.





En la producción de corriente inducida lo importante es el flujo concatenado, o flujo atravesante.

necen constantes. Si introducimos en P una barrita de hierro dulce, se induce una corriente en S. El flujo de campo ha permanecido constante, y ha variado en cambio el flujo de inducción, pues ha variado la permeabilidad del núcleo de P.

Por lo tanto: *en un circuito se produce corriente inducida cuando varía el flujo de inducción que lo atraviesa.*

Podría pensarse que esta conclusión contradice la siguiente experiencia en donde la variación del flujo de campo parece ser la causa de la producción de la corriente inducida: Quitamos el núcleo de P, y luego variamos I; varía H, varía el flujo de campo y aparece corriente en S. Pero no hay tal contradicción, pues ahora P tiene núcleo de aire, de permeabilidad 1, y ya sabemos que en aire, el flujo de campo y el flujo de inducción son una sola y misma cosa, por lo que al variar I ha variado el flujo de inducción.

También es importante insistir en que el que debe variar es el flujo de inducción *que atraviesa a S*, llamado *flujo atravesante* o *concatenado*. Si dos solenoides están colocados paralelamente, cuando se varíe el flujo de inducción del primario, en el secundario aparece corriente inducida, pues hay flujo atravesante. En cambio, si disponemos los solenoides perpendicularmente, no hay flujo concatenado, y por lo tanto, no puede aparecer corriente inducida en el secundario.

La velocidad de variación del flujo

Recordemos otro resultado experimental muy importante: *la corriente inducida es tanto más intensa cuanto más rápidamente varía el flujo de inducción concatenado.* Este resultado puede expresarse cuantitativamente, como veremos en seguida.

Supongamos que en un solenoide el flujo de inducción valga Φ_1. Si se lo hace crecer hasta alcanzar un valor Φ_2, llamaremos *variación del flujo de inducción*, $\Delta\Phi$, a la diferencia entre el flujo final y el inicial:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$$

Si esa variación tardó un tiempo Δt en producirse, llamaremos *velocidad de variación* del flujo de inducción, al cociente $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, que representa la rapidez con que se ha producido la variación del flujo. En símbolos:

$$v = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Midiendo $\Delta\Phi$ en maxwells y Δt en segundos, v resulta medida en $\frac{\text{Mx}}{s}$.

EJEMPLO: *Una bobina con núcleo de aire de 25 cm de largo y 10 cm² de sección, tiene 500 espiras. Por ella circula una corriente de 5 A, y en un momento dado se la aumenta a 8 A, en 0,1". Calcular la variación de flujo y la velocidad de variación de flujo.*

$$\Phi_1 = B_1 S = \mu H_1 S, \quad \text{pero} \quad \mu = 1, \quad \text{y}$$

$$H_1 = \frac{4\pi}{10} I_1 \frac{N}{l} = \frac{4\pi}{10} \cdot 5 \text{ A} \cdot \frac{500 \text{ e}}{25 \text{ cm}} = 125{,}6 \text{ Oe}$$

Por lo tanto:

$$\Phi_1 = 125{,}6 \text{ Oe} \cdot 10 \text{ cm}^2 = 1\,256 \text{ Mx} \qquad (1)$$

Cuando la intensidad vale 8 A, el campo es:

$$H_2 = \frac{4\pi}{10} \cdot 8 \text{ A} \cdot \frac{500 \text{ e}}{25 \text{ cm}} \cong 201 \text{ Oe}$$

Por lo tanto:

$$\Phi_2 = 201 \text{ Oe} \cdot 10 \text{ cm}^2 = 2\,010 \text{ Mx} \qquad (2)$$

De (1) y (2):

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 754 \text{ Mx}$$

Como eso $\Delta\Phi$ se produjo en $\Delta t = 0{,}1"$, la velocidad de variación es:

$$v = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{754 \text{ Mx}}{0{,}1"} = 7\,540 \frac{\text{Mx}}{s}$$

Ley de Faraday

Faraday buscó la relación cuantitativa entre la velocidad de variación del flujo y la fuerza electromotriz inducida, y sus experiencias le permitieron enunciar la ley que lleva su nombre:

> La f. e. m. inducida es igual a la velocidad de variación del flujo.

En símbolos:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Como $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ se mide en $\frac{\text{Mx}}{s}$, la f. e. m. inducida resulta medida en $\frac{\text{Mx}}{s}$. Pero esta unidad es poco empleada, por lo que es necesario conocer su equivalencia con el volt, que es:

$$1 \frac{\text{Mx}}{s} = 0{,}000\,000\,01 \text{ V} = 10^{-8} \text{ V}$$

Luego,

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} \text{ (en V)}$$

Para saber cuál es el sentido de la corriente inducida, recordemos la regla de Lenz: el sentido de la I debe ser tal que se oponga a las acciones que la generaron; o bien, en este caso: *el sentido de la f.e.m. inducida debe ser tal que se oponga a la variación de flujo que la genera.* Si el flujo crece, la f. e. m. inducida tiene un sentido tal que la corriente inducida se opone al

crecimiento del flujo; si el flujo disminuye, el sentido de la f. e. m. es tal que la corriente inducida trata de evitar la disminución del flujo. Todo esto se condensa y se expresa con un simple signo menos en la fórmula de la ley de Faraday, que toma así su forma definitiva:

$$E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} \text{ (en volts)}$$

Ésta es una de las leyes más importantes de la física. A pesar de su forma sencilla, abarca un amplísimo conjunto de fenómenos. Para valorarla basta pensar cuántos hechos se sintetizan en ella: lo que ocurre cuando un imán se acerca o se aleja de una espira o de un solenoide; cómo influye la rapidez con que lo hace; qué importancia tiene el núcleo; lo que ocurre con dos solenoides cercanos cuando se varía la intensidad de la corriente de uno de ellos, o su núcleo, etc.

Si en lugar de una sola espira se trata de un solenoide con N espiras, todo sucede como si tuviéramos N generadores iguales y conectados en serie. Por lo tanto, la f. e. m. inducida en la bobina será:

$$E = -N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} \text{ (en Volts)}$$

EJEMPLOS: *Una espira de 20 cm² de superficie está situada normalmente en un campo de 100 Oe que se anula en 0,01 s. ¿Cuánto vale la f. e. m. inducida en la espira?*

$$E = -N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8}$$

$$\Phi_1 = B_1 S = \mu H_1 S = 1 \cdot 100 \text{ Oe} \cdot 20 \text{ cm}^2 = 2\,000 \text{ Mx}$$

$$\Phi_2 = B_2 S = \mu H_2 S = 1 \cdot 0 \cdot 20 \text{ cm}^2 = 0$$

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 0 - 2\,000 \text{ Mx} = -2\,000 \text{ Mx}$$

$$E = -\frac{-2\,000 \text{ Mx}}{\frac{1}{100} \text{ seg}} \cdot 10^{-8} = 200\,000 \cdot 10^{-8} = 0{,}002 \text{ V}$$

¿Cuál sería el valor de la f.e.m. inducida en el primer ejercicio, si la espira tuviese un núcleo de permeabilidad $\mu = 20$?

El flujo inicial de campo sigue valiendo 2 000 Mx, pero en cambio el flujo de inducción vale 20 veces más, por lo que ahora $\Phi_1 = 40\,000$ Mx.

Como Φ_2 sigue valiendo *cero*, resulta

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = -40\,000 \text{ Mx}$$

$$\therefore E = -\frac{-40\,000 \text{ Mx}}{\frac{1}{100} \text{ s}} \cdot 10^{-8} \text{ V}$$

$$E = 0{,}04 \text{ V}$$

¿Cuál sería el valor de la f.e.m. inducida en el ejercicio anterior, si en lugar de tratarse de una sola espira se trata de un solenoide de 100 vueltas?

El flujo concatenado inicial y final es independiente del número

de espiras, pues ese flujo es producido por un campo *externo* a la bobina.

Por lo tanto,

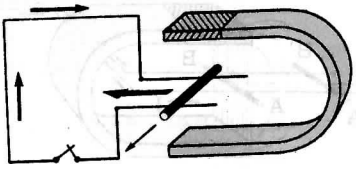
$$\Delta \Phi = -40\,000 \text{ Mx}$$

Pero en cambio, E sí depende del número de espiras, pues la bobina equivale a N generadores iguales en serie, por lo cual:

$$E = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8}$$

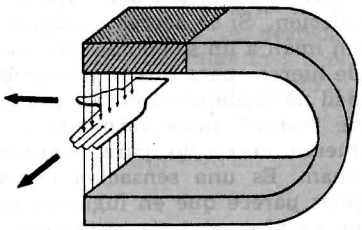
$$E = -100 \frac{-40\,000 \text{ Mx}}{1/100 \text{ s}} \cdot 10^{-8}$$

$$E = 4 \text{ V}$$



Al mover el conductor varía la superficie, y por lo tanto el flujo concatenado, y en el circuito se produce una corriente inducida.

Regla de la mano derecha: si la palma de la mano derecha recibe las líneas de fuerza del campo inductor y el pulgar señala el sentido del movimiento, la corriente inducida penetra por la muñeca y sale por la punta de los dedos.

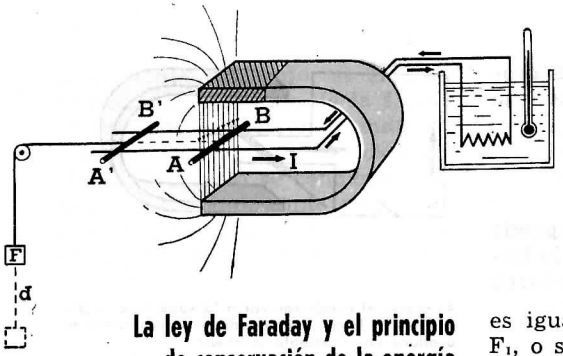


Corriente inducida en un conductor móvil

En páginas anteriores* hemos descripto una experiencia que evidencia el movimiento que adquiere un conductor cuando por él circula corriente y está situado en un campo magnético (ley de Laplace). El fenómeno es reversible: si quitamos la pila, cerramos el circuito y *nosotros* movemos el conductor, aparece una corriente inducida. ¿Cuál es su sentido? Por la regla de Lenz resulta inmediatamente: al mover el conductor en el sentido de la flecha, disminuye la superficie atravesada por el flujo, y por lo tanto, el flujo de inducción disminuye; la corriente inducida se opone a esa disminución para lo cual circula, de modo que por la cara superior entre flujo, o sea que en esa cara se genera un polo S. La regla de las agujas del reloj indica el sentido de la corriente (el de las agujas del reloj).

Una manera más sencilla de obtener el sentido de la corriente inducida se obtiene mediante la *Regla de la palma de la mano derecha:* Se coloca la mano derecha de modo que las líneas del campo inductor perforen la palma, y el pulgar indique el sentido en que movemos el conductor; entonces, la corriente inducida entra por la muñeca y sale por la punta de los dedos. Como se ve, es justamente la inversa de la regla de la palma de la mano izquierda.

* Véase capítulo 24.



Experiencia para medir el trabajo realizado y la energía obtenida, y con ello calcular la f.e.m. inducida.

La ley de Faraday y el principio de conservación de la energía

La energía eléctrica de una corriente inducida resulta del trabajo que debe efectuarse para provocar la variación del flujo de inducción. Si se acerca rápidamente un imán a un solenoide con núcleo de hierro –para que la permeabilidad multiplique el efecto–, se puede "sentir" muscularmente el esfuerzo necesario para acercar el imán. Es una sensación extraña, pues parece que en lugar de estar en el aire, el imán estuviera sumergido en algo viscoso, como la miel.

La ley de Faraday se puede deducir del principio de conservación de la energía. En efecto:

Al trasladar la varilla de AB a A'B', recorriendo una distancia d aparece una intensidad inducida I, que tiene el sentido indicado. Pero sobre un conductor móvil situado en un campo magnético, actúa una fuerza F_1 (ley de Laplace) que vale:

$$F_1 = \frac{1}{10}\,\mu\,H\,I\,l\,\operatorname{sen}\alpha$$

(l = longitud de la varilla)

Por lo tanto, la fuerza que realizamos para mover la varilla es igual y de sentido contrario a F_1, o sea:

$$F = -F_1 = -\frac{1}{10}\,\mu\,H\,I\,l\,; \quad \operatorname{sen}\alpha = 1,$$

pues suponemos $\alpha = 90^{\circ}$.

El trabajo que realizamos vale, en consecuencia,

$$W = F \cdot d = -\frac{1}{10}\,\mu\,H\,I\,l\,d\,,$$

pero $l \cdot d = \Delta S$, superficie barrida por la varilla.

$$W = -\frac{1}{10}\,\mu\,H\,I\,\Delta S\,,$$

donde W resulta medido en ergios (pues en la fórmula de F, ésta resulta medida en *dyn* al medir I en A, H en Oe y l en cm).

Si el movimiento dura Δt segundos, este trabajo se transforma en energía eléctrica, que vale $W = E\,I\,\Delta t$, siendo E la fuerza electromotriz inducida. Como E se mide en volts, I en A y Δt en seg, la energía resulta ahora en joules. Para reducirla a ergios, basta recordar que $1\ J = 10^7$ erg. Por lo tanto, la energía eléctrica resulta ser:

$$W = E\,I\,\Delta t \cdot 10^7 \text{ (ergios)}$$

Como esta energía proviene del trabajo realizado, debe cumplirse que:

$$E\,I\,\Delta t \cdot 10^7 = -\frac{1}{10}\,\mu\,H\,I\,\Delta S\,,$$

pero

$$\mu H \Delta S = B \Delta S = \Delta \Phi \quad \therefore \quad E I \Delta t \cdot 10^7 = -\frac{1}{10} I \Delta \Phi$$

$$\therefore \quad E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} \text{ (volts)}$$

Para hacer una comprobación cuantitativa, pueden disponerse las cosas como muestra la figura: al bajar la pesita –cuyo peso debemos conocer– se mueve el conductor. El trabajo realizado vale $W = Pd$. Para medir la energía eléctrica, con el amperímetro medimos la intensidad, y calculamos la resistencia del conductor por la fórmula

$$R = \varrho \frac{l}{s}$$

Si la pesa tarda en caer Δt segundos, la energía eléctrica (que se transforma en calor de Joule) vale $R I^2 \Delta t$. Como sabemos que $1 \text{ J} = 0{,}24$ cal, podemos comprobar la equivalencia entre ambas energías.

EJEMPLOS: *Un conductor se mueve sobre dos rieles horizontales y está colocado en un campo magnético uniforme de 100 Oe, cuyas líneas de fuerza son verticales y hacia abajo. El conductor mide 20 cm de longitud y se desplaza 12 cm en 0,05". Calcular la f. e. m. inducida durante el movimiento.*

$$\left.\begin{aligned} E &= -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} \\ \Delta \Phi &= B \Delta S \end{aligned}\right\} \quad E = -\frac{B \Delta S}{\Delta t} \cdot 10^{-8}$$

$$E = -\frac{100 \text{ Oe} \cdot 20 \text{ cm} \cdot 12 \text{ cm}}{0{,}05''} \cdot 10^{-8} \text{ V} = 0{,}0048 \text{ V}$$

¿Qué intensidad recorre el circuito anterior, suponiendo que la resistencia total es de 0,01 Ω?

De acuerdo con la ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0{,}0048 \text{ V}}{0{,}01\ \Omega} = 0{,}48 \text{ A}$$

¿Qué energía eléctrica se desarrolló en el ejercicio anterior? Conocida esa energía, ¿qué fuerza actuó sobre el conductor móvil durante su desplazamiento?

$$W = E I t = 0{,}0048 \text{ V} \times$$
$$\times 0{,}48 \text{ A} \cdot 0{,}05'' = 0{,}000\ 115 \text{ J}$$

Como la energía eléctrica obtenida es igual al trabajo mecánico realizado al desplazar al conductor, $W = F d$, resulta:

$$F = \frac{W}{d} =$$

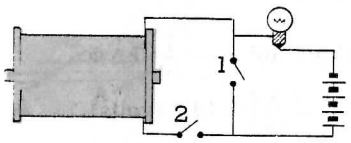
$$= \frac{0{,}000\ 115 \text{ J}}{0{,}12 \text{ m}} \cong 0{,}000\ 96 \text{ N} =$$

$$= 96 \text{ dyn}$$

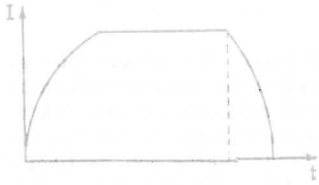
$$F = 96 \text{ dyn} \cong 0{,}98 \text{ g}$$

Autoinducción

Si varía la intensidad de la corriente que recorre un circuito, en él se produce una corriente autoinducida, cuyo sentido, de acuerdo con la regla de Lenz, es contrario



Instalación para observar las extracorrientes de cierre y apertura.



Representación gráfica de la intensidad en un circuito con autoinducción.

al de la variación de la intensidad que la produjo: si la corriente autoinducida se produjo por un aumento de la corriente principal, la autoinducida tendrá sentido opuesto a la principal: si el origen es una disminución de la intensidad principal, la autoinducción tendrá el mismo sentido. Por eso se suele llamar "inercia eléctrica" a la autoinducción, porque siempre se opone a la variación de la intensidad, así como la inercia mecánica se opone a las variaciones de velocidad de un cuerpo.

En los circuitos de corriente continua (CC) sólo se produce autoinducción en el cierre y apertura del circuito, o cuando ocasionalmente varía la intensidad; en los de corriente alterna (CA), en cambio, permanentemente hay autoinducción, pues la intensidad de la corriente varía en cada instante.

La siguiente experiencia muestra los efectos de la autoinducción. La bobina empleada tiene unos 5 cm de diámetro y unas 250 vueltas de alambre de cobre; un núcleo de hierro dulce, formado con trozos rectilíneos de alambre, puede introducirse y sacarse fácilmente. La lamparita es para 6,3 V, y la batería puede estar constituida por cuatro pilas secas de 1,5 V cada una.

Primero se cierra la llave 1, manteniendo abierta la 2, y la lamparita se enciende inmediatamente sin ninguna dificultad, pues la bobina con autoinducción ha quedado fuera del circuito; luego se repite la experiencia, pero habiendo previamente cerrado la llave 2. La lamparita no se enciende como antes, sino que lo hace de a poco, aunque finalmente brilla con la misma intensidad que en el primer caso. Con ello se ha puesto de manifiesto la *extracorriente de cierre*, de sentido opuesto al de la corriente principal.

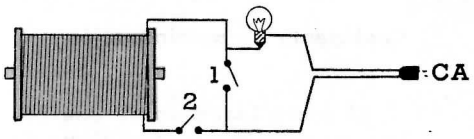
Si cuando la intensidad de la corriente ha alcanzado ya su régimen (el valor que le corresponde de acuerdo con la ley de Ohm), se abre la llave 1 (con lo cual queda fuera del circuito la batería), la lamparita no se apaga instantáneamente, sino que sigue encendida unos instantes más, a pesar de que la batería está desconectada. Así se pone de manifiesto la *extracorriente de apertura*, que tiene el mismo sentido que la corriente principal.

Podemos representar gráficamente los efectos de las extracorrientes sobre el régimen normal de la corriente. De acuerdo con la ley de Ohm, y si no existiera

autoinducción, la intensidad de corriente, inmediatamente después de haber cerrado el circuito, debería alcanzar el valor indicado por el segmento horizontal. Pero como la extracorriente de cierre se opone a la corriente principal, al principio la corriente resultante es menor que lo que debiera ser según la ley de Ohm, por lo cual los valores iniciales están por debajo de la recta paralela. Pasado el fenómeno –que dura breves instantes– se alcanza el estado de régimen, y la intensidad cumple con lo que dispone la ley de Ohm. Al abrir el circuito ocurre lo contrario. La corriente principal debería desaparecer instantáneamente, pero la extracorriente de apertura la hace durar unos instantes más, de modo que la anulación se produce menos bruscamente.

Como se observa, la duración de la extracorriente de cierre es mayor que la de apertura. Lo que ocurre es que la resistencia eléctrica que se opone a la primera es fija, porque es la resistencia de la bobina. En cambio la resistencia que se opone a la de apertura crece rápidamente a medida que se va abriendo el interruptor, porque entre los contactos se está interponiendo aire, que es aislador. Si la fuerza electromotriz autoinducida es grande, puede vencer la resistencia del aire y hacer saltar una chispa entre los contactos.

En los circuitos de corriente alterna (CA) *siempre* se produce autoinducción, porque la intensidad de la CA varía continuamente en magnitud y sentido. Si se repite la experiencia, pero utilizando una lámpara de 220 V y 15 W, conectada a 220 V de CA, se observará que al trabajar la bobina –llave 2 cerrada, llave 1 abierta– disminuye considerablemente el brillo de la lámpara, mostrando el efecto de la autoinducción.

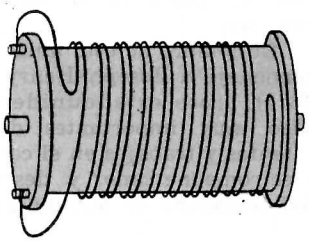


En un circuito de CA, en el que haya una bobina con autoinducción, permanentemente hay extracorrientes de cierre y apertura, y la bobina produce un efecto semejante al de una resistencia óhmica.

En un circuito de CA como se ve, una bobina con autoinducción produce un efecto semejante a una resistencia, pues la intensidad de la corriente varía al introducir la bobina. Por eso, en los circuitos de CA es necesario tener presente no solamente la resistencia óhmica de los conductores, sino también su *resistencia inductiva*, o *inductancia*.

Si se quiere evitar que una bobina tenga autoinducción, se la debe enrollar de manera especial, por ejemplo como la que muestra la figura, para que el efecto de una espira sea contrarrestado por el de otra.

Una de las maneras de construir una bobina para que no tenga autoinducción.



Coeficiente de autoinducción

El poder inductivo de una bobina se mide por su *coeficiente de autoinducción*, o también *coeficiente de self-inducción* (en inglés, *self* significa "auto"), que enseguida vamos a definir.

DEFINICIÓN: *Se llama coeficiente de autoinducción L de una bobina, al cociente entre la f. e. m. inducida — E y la velocidad con que varía la intensidad de la corriente principal.*

En símbolos:

$$L = -\frac{E}{\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)}$$

UNIDAD DE AUTOINDUCCIÓN. Si E se mide en voltios y $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$ en A/s, se obtiene la unidad de autoinducción llamada *henry*:

$$1\ Hy = \frac{1\ V}{1\ A/s}$$

Una bobina tiene un coeficiente de autoinducción de 1 Hy, si cuando la intensidad de la corriente principal varía a razón de 1 A/s se genera una f. e. m. autoinducida de 1 V. He aquí algunos valores corrientes de autoinducción: el coeficiente de autoinducción de la bobina de una campanilla eléctrica común es del orden de 0,01 Hy; la de la bobina de un galvanómetro corriente es de un par de henrys, etc.

El nombre de esta unidad es un homenaje a Joseph Henry (1787-1878), físico estadounidense que hizo muy importantes descubrimientos y trabajos en el campo del electromagnetismo, y descubridor del fenómeno de autoinducción.

Inducción mutua

En páginas anteriores* hemos referido una experiencia donde se induce una f. e. m. en un circuito, llamado *secundario*, por variaciones de la intensidad de corriente que recorre otro circuito próximo, llamado *primario*. Se dice entonces que ambos circuitos están *acoplados electromagnéticamente* por *inducción mutua*. Para que el efecto sea más notable suele bobinarse el secundario sobre el primario, pues así el flujo concatenado por el secundario es mayor.

La magnitud de la inducción mutua se mide por el *coeficiente de inducción mutua*, que se calcula por la fórmula siguiente:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

siendo L_1 y L_2 los coeficientes de autoinducción de ambas bobinas acopladas.

Esta fórmula es válida cuando el secundario concatena *todo* el flujo producido por el primario, lo que depende principalmente de la disposición de las dos bobinas. En general, siempre hay algo de dispersión del flujo, por lo que

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

siendo k un coeficiente numérico, llamado coeficiente de acoplamiento y que solamente vale 1 en el caso en que la dispersión sea nula.

EJEMPLO: *Calcular el coeficiente de inducción mutua de dos bobinas de 0,2 Hy y 2,5 Hy de auto-*

---

* Véase pág. 403.

En 1892, Bell, inventor del teléfono, inaugura el servicio de larga distancia entre Chicago y Nueva York.

inducción, suponiendo que no hay dispersión del flujo.

$$M = \sqrt{L_1 L_2} = \sqrt{0{,}2 \text{ Hy} \cdot 2{,}5 \text{ Hy}}$$
$$M = \cong 0{,}7 \text{ Hy}$$

Aplicaciones del efecto Faraday

El teléfono

Aunque se discute quién inventó el teléfono, fue el norteamericano Graham Bell quien lo hizo aplicable al servicio público.

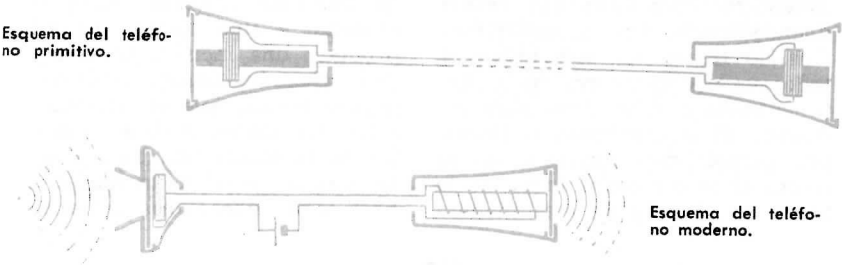
En el modelo primitivo de Bell, de 1876, el transmisor y el receptor son iguales. Constan de una barra imanada, en uno de cuyos extremos hay una bobina. Frente a ésta hay una placa de hierro dulce muy flexible, por lo cual vibra al hablar frente a ella. Se tiene entonces el caso de un imán (la placa imanada por la bobina) que se acerca y se aleja de un solenoide (la bobina), de modo que en el solenoide se generan corrientes inducidas, que circulan por la línea y pasan por la bobina del receptor.

Según sea la intensidad y el sentido de esta corriente, se producirá un aumento o una disminución de la atracción de la bobina del receptor sobre la correspondiente placa, que entonces vibrará al unísono con la placa del transmisor, reproduciendo los mismos sonidos que fueron emitidos delante de ésta.

Con este tipo de teléfono la transmisión era defectuosa, y los experimentos para mejorarla llevaron a la invención del micrófono.

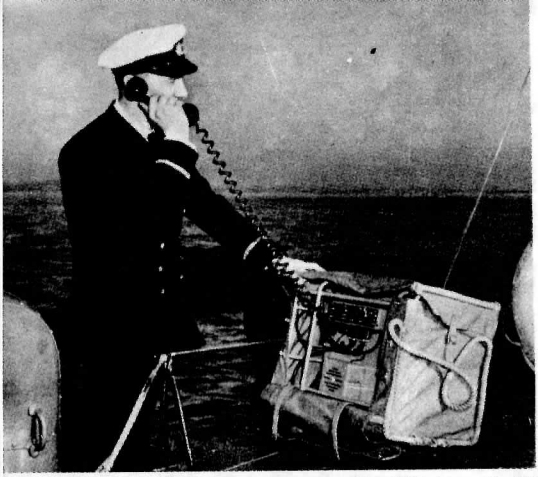
El micrófono

Se basa en una propiedad del carbono: su resistencia eléctrica varía apreciablemente al variar la presión que se ejerce sobre él. En



Esquema del teléfono primitivo.

Esquema del teléfono moderno.



Radioteléfono transportable VHF, tipo HP 868, usado por la Dirección del Puerto de Southampton, en una lancha de control.

el micrófono se tiene la placa elástica en contacto con un recipiente con granitos de carbón, de modo que al vibrar la placa por el sonido emitido frente a ella, presiona con mayor o menor intensidad a los granos de carbón; esas variaciones de presión provocan variaciones de la resistencia, y por lo tanto la intensidad de la corriente.

El teléfono automático

Cuando se marca un número, por ejemplo el 6, el disco cierra y abre el circuito 6 veces, es decir, se envían 6 impulsos eléctricos a la estación central. En ella hay un tablero con miles de pequeños conmutadores formados por *relais*, dispuestos en filas y columnas. Cuando llegan los seis impulsos, todos los conmutadores de la sexta columna quedan listos para cerrarse. Si a continuación llegan, por ejemplo, tres impulsos más, se cierra el tercer conmutador de la sexta columna, y de esta manera quedan habilitadas las líneas de la estación de característica 63. En forma análoga, al discar los números siguientes se accionan otros *relais*, que finalmente establecen la comunicación con el teléfono deseado.

Actualmente se pueden realizar varios centenares de comunicaciones simultáneas por un mismo par de cables, es decir, varios centenares de personas pueden estar hablando simultáneamente por medio del mismo cable, sin que una conversación se interfiera con la otra. Al establecerse la comunicación, ingeniosos mecanismos transmiten con una frecuencia determinada la corriente eléctrica producida; si simultáneamente se establece otra comunicación que utilice el mismo cable, dicho mecanismo la transmite con otra frecuencia, y así hasta completar todas las frecuencias distintas.

El fonógrafo

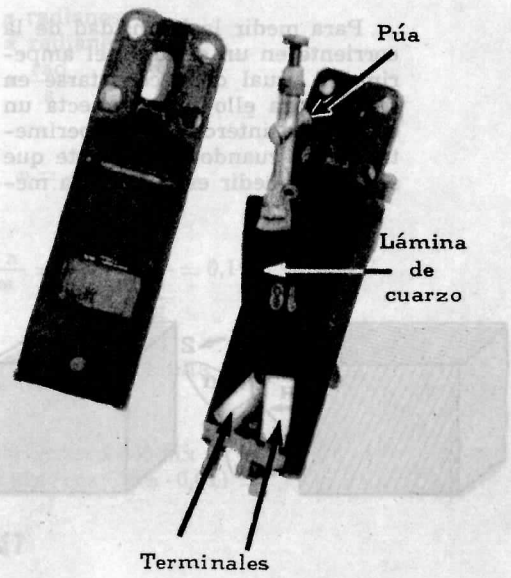
Varios fueron los hombres de ciencia que construyeron fonógrafos casi simultáneamente, pero quien tuvo mayor éxito fue Tomás Alva Édison, en 1875. Su aparato era muy sencillo, pues consistía en un cilindro que giraba alrededor de su eje y llevaba enrollada una hoja de estaño. Una aguda punta de diamante, ajustada por su otro extremo a una lámina de mica producía una incisión en el cilindro. Cuando Édison gritaba, al mismo tiempo que el cilindro giraba, las ondas sonoras, concentradas mediante una bocina sobre la lámina de mica, la hacían vibrar, y sus vibraciones se transmi-

tían a la punta de diamante, que grababa ondas sobre el cilindro de estaño. En esto consistía la grabación. Para reproducir el sonido grabado se hacía girar nuevamente el cilindro, con lo cual la punta de diamante, al seguir el surco, entraba en vibración, transmitía sus movimientos a la lámina de mica y se volvían a obtener las ondas sonoras.

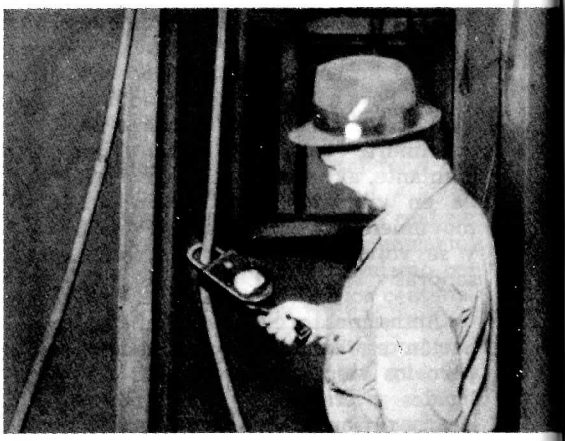
Actualmente, el proceso de grabación es, en esencia, el mismo, pero los mecanismos son más delicados y precisos. Un micrófono recoge el sonido que se desea grabar; sus vibraciones eléctricas son amplificadas, mediante válvulas electrónicas, y la corriente amplificada recorre un pequeño electroimán, que mueve un diminuto cincel con punta de diamante, que graba un surco sobre un disco de cera. Concluida la grabación, este disco se coloca en una campana, y frente a él se pone una lámina de oro; luego se hace el vacío y se conectan el disco y la lámina de oro con una fuente de alta tensión. Al cabo de una hora de funcionar, el disco de cera está totalmente dorado, con su superficie recubierta con una tenue capa de oro. Concluido este proceso, el disco dorado se pone como cátodo de una cuba electrolítica; el ánodo y el electrólito son de cobre. Se realiza la electrólisis, y sobre el oro se deposita una capa de cobre, lo suficientemente consistente como para poder sacarla sin que se rompa. Se funde la cera, y la superficie de oro que ha estado en contacto con ella tiene como una arruga en espiral, que corresponde al surco que tenía el disco de cera: éste es el negativo del disco. Mediante otros procesos se obtiene un nuevo negativo, esta vez cromado y de superficie dura, que es la matriz para luego poder fabricar con ella los miles de discos que se venden al público. Con cada matriz pueden hacerse hasta unos dos millones de copias.

La reproducción del disco se efectúa mediante el llamado *pick-up*. Los hay de varios tipos: el de cristal está basado en un efecto que descubrió Pierre Curie. Si un cristal de cuarzo se estira o se comprime en cierta dirección, aparece una diferencia de potencial en las superficies normales a la dirección de la fuerza aplicada. A la inversa: si se coloca un cristal de cuarzo entre dos placas conductoras y se aplica a éstas una diferencia de potencial, aparecen tensiones elásticas que deforman el cristal. El efecto directo se aplica en la construcción de los fonocap-

"Pick-up" de cristal de un moderno "tocadiscos".



Amperímetro de gancho.



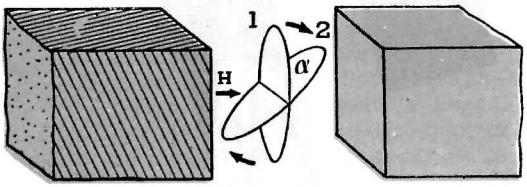
Cómo se usa el amperímetro de gancho.

tores: el movimiento de la púa produce compresiones y dilataciones que originan diferencias de potencial que, amplificadas, son emitidas por el parlante en forma de sonidos.

Amperímetro

Para medir la intensidad de la corriente en un circuito, el amperímetro usual debe conectarse en serie. Para ello se desconecta un cable y se intercala el amperímetro. Pero cuando la corriente que se quiere medir es alterna, la medición se hace muy cómodamente sin interrumpir la corriente mediante los instrumentos llamados "de gancho"; éstos tienen una mandíbula que se abre para abrazar el cable, y luego se cierra. Como la corriente es alterna, sus variaciones provocan en la tenaza –que actúa como una espira– una fuerza electromotriz inducida proporcional a la intensidad de la corriente alterna que circula por el cable.

Corriente alterna



La corriente eléctrica más utilizada es la alterna, sobre todo por la mayor facilidad y economía con que se la puede transportar a largas distancias. Para generarla basta que en una bobina se produzca un flujo continuamente variable.

Flujo rápidamente variable

Como la fuerza electromotriz inducida es igual a la velocidad de variación del flujo, las fuerzas electromotrices elevadas se consiguen variando el flujo lo más rápidamente posible. La forma más sencilla es hacer girar una bobina en un campo magnético.

Para simplificar: consideremos en primer lugar una bobina construida con una sola espira, de sección S, que gira con velocidad angular ω en un campo magnético H, que crea en la espira una inducción B.

Supongamos que la espira comience a girar partiendo de la posición normal a H, y que en un cierto tiempo t describe el ángulo α, pasando a la posición z. En z, el flujo de inducción vale

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Si t es el tiempo que tardó en describir el ángulo α,

$$\alpha = \omega t,$$

y por lo tanto,

$$\Phi = BS \cos \omega t$$

Esta fórmula nos da el flujo de inducción en cada instante. Cuando $t = 0$, el flujo es máximo, pues $\cos \omega t = 1$, y entonces $\Phi = BS$.

Si llamamos Φ_0 al flujo máximo BS

$$\boxed{\Phi = \Phi_0 \cos \omega t}$$

EJEMPLOS: *Una espira de 20 cm² de sección gira a razón de 10 vueltas por segundo en un campo H = 50 Oe. Calcular:*

a) *Período y frecuencia del movimiento de la espira;* b) *Inducción en la espira, suponiendo que el núcleo de la bobina tiene permeabilidad* $\mu = 2$; c) *Flujo de inducción máximo;* d) *Flujo de inducción a los 0,01ˢ; 0,02ˢ; y 2ˢ de haber comenzado el movimiento.*

a) Como 1 vuelta $= 2\pi$ radianes.

10 vueltas $= 20\pi$ radianes,

$$\therefore \omega = 20\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Por lo tanto, como

$$\omega = \frac{2\pi \text{ rad}}{T},$$

resulta:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi \text{ rad}}{20\pi \frac{\text{rad}}{\text{seg}}} = 0{,}1^{\text{s}}$$

Llamando f a la frecuencia, $f = \frac{1}{T}$ resulta $f = 10$.

b) $B = \mu H$

$B = 2 \cdot 50 = 100$ gauss.

c) $\Phi_0 = BS = 100 \text{ gauss} \cdot 20 \text{ cm}^2 = 2\,000 \text{ Mx}$

d) $\Phi_1 = \Phi_0 \cos \omega t = 2\,000 \text{ Mx} \cdot \cos (20\pi \cdot 0{,}01) =$

Como $\cos\ (20\,\pi \cdot 0{,}01) = \cos \frac{\pi}{5} = 0{,}809$, resulta:

$\Phi_1 = 2\,000\ \text{Mx} \cdot 0{,}809 = 1\,618\ \text{Mx}$

$\Phi_2 = 2\,000\ \text{Mx} \cdot \cos \left(20\,\pi \cdot \frac{1}{50} \right)$

$= 2\,000\ \text{Mx} \cdot \cos \frac{2\,\pi}{5} = 2\,000\ \text{Mx} \cdot 0{,}309 = 618\ \text{Mx}$

$\Phi_3 = 2\,000\ \text{Mx} \cdot \cos\ (20\,\pi \cdot 2) = 2\,000\ \text{Mx} \cdot \cos 40\,\pi =$

$= 2\,000\ \text{Mx} \cdot 1 = 2\,000\ \text{Mx}$

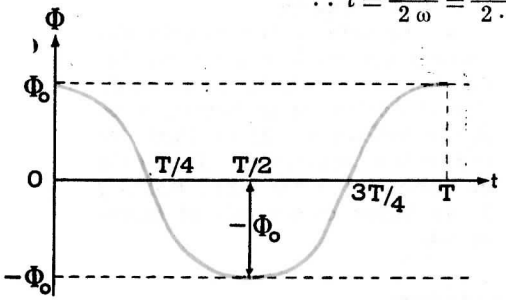
En el caso anterior, ¿en qué instante el flujo de inducción vale cero?

Para que $\Phi = \Phi_0 \cos \omega\, t$.

Para que $\Phi = 0$, debe ser $\cos \omega\, t = 0$.

Para que $\cos \cdot\, \omega\, t = 0$, debe ser $\omega\, t = \frac{\pi}{2}$

$$\therefore\ t = \frac{\pi}{2\,\omega} = \frac{\pi}{2 \cdot 20\,\pi} = \frac{1^s}{40} = 0{,}025^s$$



Representación gráfica del flujo magnético que atraviesa la bobina, en función del tiempo.

Representación gráfica del flujo en función del tiempo. Como en el ejercicio anterior, es posible calcular el flujo de inducción en cada instante t después de haber comenzado a girar la espira. Para "ver" el fenómeno, lo mejor es representar gráficamente cómo varía Φ al transcurrir el tiempo t. Como la fórmula $\Phi = \Phi_0 \cos \omega\, t$, corresponde a una cosinusoide de amplitud Φ_0, si llamamos T al período de la espira, resulta:

$$\omega = \frac{2\,\pi}{T} \qquad \Phi = \Phi_0 \cos \frac{2\,\pi}{T}\, t$$

En el instante $t = 0$, $\cos \frac{2\,\pi\, t}{T} = 1$ y $\Phi = \Phi_0$: flujo máximo.

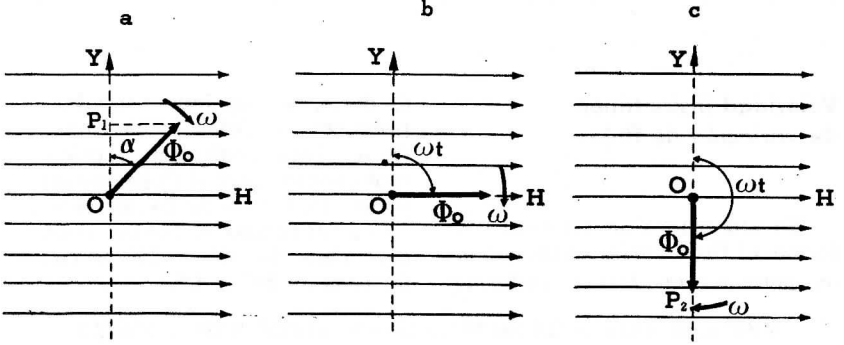
En el instante $t = \frac{T}{4}$, $\cos \frac{2\,\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} = 0$ y $\Phi = 0$: flujo nulo.

En el instante $t = \frac{T}{2}$, $\cos \frac{2\,\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} =$

$= \cos \pi = -1$; $\Phi = -\Phi_0$: flujo mínimo.

En el instante $t = \frac{3}{4}\,T$, $\cos \frac{2\,\pi}{T} \cdot \frac{3}{4}\,T = 0$; $\Phi = 0$: flujo nulo.

En el instante $t = T$, $\cos \frac{2\,\pi}{T} \cdot T = 1$; $\Phi = \Phi_0$: flujo máximo.

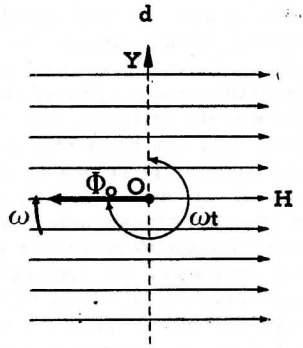


Y así, sucesivamente, se van obteniendo los valores necesarios para construir la curva.

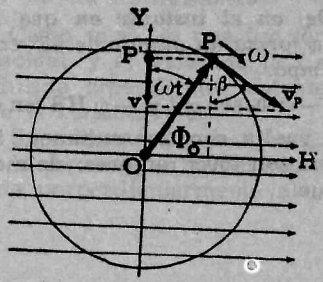
El valor Φ del flujo concatenado con la bobina en cada instante, puede obtenerse como proyección sobre el eje OY de un vector de longitud Φ_0 que gira con velocidad angular ω: **a)** el vector Φ_0 ha descrito un ángulo ωt: en ese instante, el flujo concatenado es $\Phi' = \Phi_0 \cos \omega t$; **b)** el vector Φ_0 ha descrito un ángulo de 90°: su proyección y el flujo concatenado son $\Phi = -\Phi_0$; **d)** el ángulo descrito es de 270°: el flujo concatenado es nulo; **e)** el ángulo descrito es de 360°: el flujo es de $\Phi = \Phi_0$.

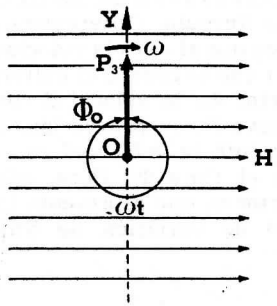
REPRESENTACIÓN DEL FLUJO POR UN VECTOR GIRATORIO. Para representar el flujo Φ que atraviesa una espira giratoria se traza un vector Φ_0 con origen en O, perpendicular al campo magnético H, y cuya longitud sea igual al flujo máximo Φ_0. Se hace girar ese vector con ω, la misma velocidad angular con que gira la espira. El flujo en cualquier instante, se obtiene proyectando sobre OY el vector Φ_0 en la posición que ocupe en ese instante.

Este método puede aplicarse no sólo al flujo, sino también a cualquier magnitud que varíe con el tiempo en forma cosinusoidal o sinusoidal.



La velocidad con que varía el flujo es la velocidad con que se mueve P', extremo del vector que lo representa.





Velocidad instantánea de variación de flujo

En una espira en rotación uniforme, el flujo varía continuamente, pero *no en forma uniforme*; es decir, que en *lapsos iguales*, se producen distintas variaciones de flujo. Para confirmarlo, calculemos cuánto varía el flujo que atraviesa una espira de 10 cm² colocada en un campo de 100 Oe, cuando ésta pasa de 30° a 35° y cuando pasa de 35° a 40°.

$$\Phi\ 30^\circ = \Phi_0 \cos\alpha = HS \cos 30^\circ = 100\ Oe \cdot 10\ cm^2 \cdot 0{,}866 = 866\ Mx$$
$$\Phi\ 35^\circ = \ldots \quad = HS \cos 35^\circ = 100\ Oe \cdot 10\ cm^2 \cdot 0{,}819 = 819\ Mx$$
$$\Phi\ 40^\circ = \ldots \quad = HS \cos 40^\circ = 100\ Oe \cdot 10\ cm^2 \cdot 0{,}766 = 766\ Mx$$
$$\Delta\Phi_1 = \Phi\ 35^\circ - \Phi\ 30^\circ = 819\ Mx - 866\ Mx = -47\ Mx$$
$$\Delta\Phi_2 = \Phi\ 40^\circ - \Phi\ 35^\circ = 766\ Mx - 819\ Mx = -53\ Mx.$$

Como el movimiento de rotación de la espira es uniforme, ésta emplea el mismo tiempo en describir el ángulo entre 30° y 35° que entre 35° y 40°, pero en esos lapsos iguales se han producido distintas variaciones de flujo. De modo que si queremos calcular la velocidad con que varía el flujo en determinado instante, nos encontramos con un problema análogo al de calcular la velocidad instantánea de un móvil que se mueve con movimiento variado: si dividimos el espacio recorrido por el lapso empleado en recorrerlo, lo que obtenemos es sólo la *velocidad media* del móvil, pero no su velocidad en un instante determinado. ¿Cómo calcular la velocidad de variación del flujo en un instante determinado? El método de los vectores giratorios nos permite obtener una fórmula. Observemos en la figura que si v_P es la velocidad lineal con que se mueve el extremo P del vector Φ_0, la velocidad con que se mueve P', su proyección, es precisamente la velocidad con que varía el flujo Φ. Pero, además, el vector v, que representa la velocidad de variación de flujo, tiene siempre *sentido opuesto* al sentido positivo del eje, lo que en las fórmulas habrá que representar con un *signo menos*.

$$v = v_P \cos\beta\ ;$$
pero $\beta = 90^\circ - \omega t \therefore \cos\beta =$
$$= \operatorname{sen}\omega t \therefore v = v_P \operatorname{sen}\omega t \qquad (1)$$

Como el movimiento de P es circular uniforme:

$$v_P = \omega\,\Phi_0 \qquad (2)$$

De (1) y (2), y si tenemos presente que el vector v tiene *sentido opuesto* al sentido positivo del eje:

$$\boxed{v = -\omega\,\Phi_0 \operatorname{sen}\omega t}$$

EJEMPLO: *Calcular la velocidad de variación de flujo en una espira de 10 cm² que gira a 50 vueltas por segundo en un campo de 100 Oe, en el instante en que la espira forma un ángulo de 45° con el campo.*

$$v = -\omega\,\Phi_0 \operatorname{sen}\omega t = -\omega\,HS \operatorname{sen}\alpha$$

1 vuelta son 2π radianes; 50 vueltas son 100π radianes: de modo que

$$\omega = 100\,\pi\,\frac{1}{s} \cong 314\,\frac{1}{s}$$

$$v = -\,314\,\frac{1}{s}\cdot 100\ \text{Oe}\cdot 10\ \text{cm}^2\cdot \operatorname{sen} 45^\circ =$$

$$= -\,314\cdot 100\cdot 10\cdot 0{,}707\,\frac{\text{Mx}}{s} = -\,221\,998\,\frac{\text{Mx}}{s}$$

$$v \cong -\,222\,000\,\frac{\text{Mx}}{s}$$

Cuando la espira pasa por los 45°, el flujo está variando a razón de 220 000 Mx en cada segundo, y está *disminuyendo*, como lo indica el signo negativo.

Valor de la f. e. m. instantánea

La ley de Faraday nos dice que:

$$\text{E} = -\,\frac{\Delta\,\Phi}{\Delta\,t}$$

donde $\frac{\Delta\,\Phi}{\Delta\,t}$ es la *velocidad media* de variación del flujo en el lapso $\Delta\,t$. Pero en el apartado anterior hemos aprendido a calcular la *velocidad instantánea* de variación de flujo, de modo que estamos en condiciones de calcular el valor de la f. e. m. inducida en un determinado instante, llamado *valor instantáneo* de la f. e. m. alterna y que designaremos con *e*.

Como la velocidad instantánea de variación de flujo, *v*, es:

$$v = -\,\omega\,\Phi_0\,\operatorname{sen}\,\omega\,t\,,$$

resulta

$$e = \omega\,\Phi_0\,\operatorname{sen}\,\omega\,t$$

Como se ve, es una función sinusoidal, y el valor de la f. e. m. inducida depende del instante en que la consideremos.

Su valor máximo lo toma cuando la espira, que ha partido colocada perpendicularmente al campo magnético H, ha dado ¼ de vuelta. En efecto: $\omega\,t = 90^\circ$ ∴ $\operatorname{sen}\,\omega\,t = 1$ ∴

$$e\ \text{máx.} = \omega\,\Phi_0$$

Al valor máximo lo designaremos con E_0 (f. e. m. máxima), con lo que nuestra fórmula del valor instantáneo es:

$$e = \text{E}_0\,\operatorname{sen}\,\omega\,t$$

La mejor forma de "ver" cómo varía la f. e. m. inducida a medida que transcurre el tiempo, es hacer su representación gráfica, que es una sinusoide de amplitud E_0; si el período es T:

$$e = \text{E}_0\,\operatorname{sen}\,\frac{2\,\pi}{\text{T}}\,t\,,$$

fórmula que permite obtener rápidamente los valores más importantes de *e*:

En el instante $t = 0$,

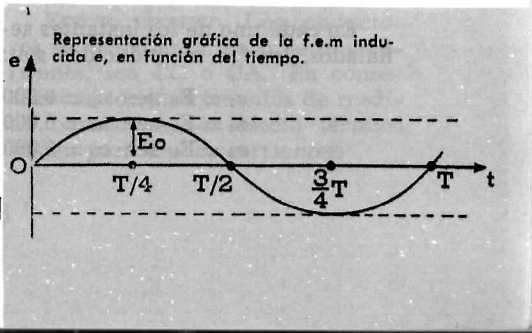
$$\operatorname{sen}\,\frac{2\,\pi}{\text{T}}\cdot 0 = 0 \qquad \therefore\ e = 0$$

(f.e.m. nula)

En el instante $t = \frac{\text{T}}{4}$,

$$\operatorname{sen}\,\frac{2\,\pi}{\text{T}}\cdot\frac{\text{T}}{4} = 1 \qquad \therefore\ e = \text{E}_0$$

(f.e.m. máxima)



Representación gráfica de la f.e.m inducida e, en función del tiempo.

En el instante $t = \frac{T}{2}$,

$$\operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} = 0 \qquad \therefore\ e = 0$$

(f.e.m. nula)

En el instante $t = \frac{3T}{4}$,

$$\operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{3T}{4} = -1 \quad \therefore\ e = -E_0$$

(f.e.m. mínima)

En el instante $t = T$,

$$\operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} \cdot T = 0 \qquad \therefore\ e = 0$$

(f.e.m. nula)

Si comparamos las representaciones gráficas de e y de Φ, observaremos que cuando el flujo es máximo, la f. e. m. inducida es nula, y cuando el flujo es nulo, la f. e. m. inducida es máxima. A primera vista puede extrañar, pero piénsese que lo que interesa para la producción de f. e. m. inducida es la *variación* de flujo, y no que el flujo sea grande o pequeño. Cuando la espira es atravesada por el máximo de flujo, una pequeña variación en la posición de la espira produce una pequeña variación en el flujo, y por lo tanto una f. e. m. inducida pequeña. En cambio, cuando la espira es paralela al campo (flujo nulo), una pequeña variación de su posición produce gran variación de flujo y una f. e. m. considerable.

EJEMPLOS: *Una espira de 10 cm² de sección gira en un campo de 25 Oe a razón de 10 vueltas por segundo. Calcular la f. e. m. máxima E_0 inducida en la espira, que tiene un núcleo de permeabilidad $\mu = 4$.*

$$\left.\begin{aligned} E_0 &= \omega\,\Phi \\ \Phi_0 &= B\,S \\ B &= \mu\,H \end{aligned}\right\} \therefore\ E_0 = \omega\,\mu\,HS$$

$$E_0 = 20\,\pi\,\frac{1}{s} \cdot 4{,}25\ \text{Oe} \cdot 10\ \text{cm}^2 \cong 62{,}8 \cdot 4 \cdot 25 \cdot 10\ \frac{\text{Mx}}{s} =$$

$$\cong 62\,800\ \frac{\text{Mx}}{s} \cong 62\,800 \cdot 10^{-8}\ \text{V} = 0{,}000\,628\ \text{V}$$

Calcular la f. e. m. inducida en la espira del problema anterior, en los instantes $t_1 = 0{,}01^s$; $t_2 = 0{,}05^s$ y $t_3 = 0{,}025^s$ después de haber sido máximo el flujo.

Calculemos primero el ángulo que forma la espira en cada uno de esos instantes, con su posición de flujo máximo:

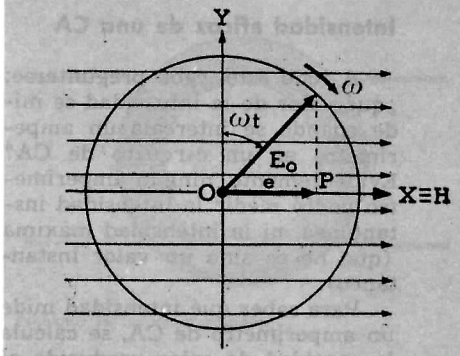
$$\alpha_1 = \omega\,t_1 = 3\,600\ ^\circ/_s \cdot 0{,}01^s = 36^\circ \therefore \operatorname{sen} \omega\,t_1 = \operatorname{sen} 36^\circ = 0{,}587$$
$$\alpha_2 = \omega\,t_2 = 3\,600\ ^\circ/_s \cdot 0{,}05^s = 180^\circ \therefore \operatorname{sen} \omega\,t_2 = \operatorname{sen} 180^\circ = 0$$
$$\alpha_3 = \omega\,t_3 = 3\,600\ ^\circ/_s \cdot 0{,}025^s = 90^\circ \therefore \operatorname{sen} \omega\,t_3 = \operatorname{sen} 90^\circ = 1$$

En cada uno de los instantes señalados, las f. e. m. inducidas son:

$$e_1 = E_0 \operatorname{sen} \alpha_1 = 0{,}000\,628\ \text{V} \cdot 0{,}587 \cong 0{,}000\,368\ \text{V}$$
$$e_2 = E_0 \operatorname{sen} \alpha_2 = 0{,}000\,628\ \text{V} \cdot 0 = 0\ \text{V}$$
$$e_3 = E_0 \operatorname{sen} \alpha_3 = 0{,}000\,628\ \text{V} \cdot 1 = 0{,}000\,628\ \text{V}$$

Como el fenómeno es periódico, y el período es 0,1", cada décimo de segundo se vuelven a repetir todos los valores. Será útil para el lector representarlos gráficamente.

REPRESENTACIÓN DE LA f. e. m. INDUCIDA MEDIANTE UN VECTOR GIRATORIO. Lo mismo que el flujo, también se puede representar la f. e. m. inducida mediante un vector giratorio. Consideremos un vector cuya longitud representa la f. e. m. inducida máxima, E_0, y hagámoslo girar con una velocidad angular ω igual a la de la espira. Imaginemos, como cuando representamos el flujo, que el campo magnético donde está colocada la espira es horizontal, y tomemos un par de ejes OX, OY, de modo que el OX coincida con la dirección y sentido del campo. La proyección del vector E_0 sobre el eje OX nos da, en magnitud y sentido, el valor de la f. e. m. inducida e en cada instante.



El valor de la f.e.m. inducida en cada instante puede calcularse como proyección sobre el eje OX de un vector giratorio E_0, que gira con velocidad angular ω.

Diferencia entre CA y CC

La mejor manera de comprender las diferencias entre CA y CC es ver cómo actúa la CA en los tres efectos típicos de la CC: químico, magnético y térmico.

EFECTO QUÍMICO. Si se pretende realizar una electrólisis empleando CA, se tendrá muy poco éxito, pues los iones electrolíticos positivos, por ejemplo, durante un breve lapso (mientras los electrodos mantienen una polaridad) se dirigirán hacia la placa que en ese instante es cátodo; pero casi de inmediato el cátodo se transforma en ánodo, y los iones positivos vuelven hacia atrás. Para todos los procesos electrolíticos es imprescindible la CC.

EFECTO MAGNÉTICO. La CA crea, como la CC, un campo magnético, pero que continuamente cambia de intensidad y de sentido. Si pretendiéramos repetir la experiencia de Oersted con CA, nada observaríamos (a no ser que el período de la CA fuera muy grande), pues la inercia propia de la aguja magnética no le permitiría seguir las rápidas variaciones del campo magnético. De acuerdo con esto, no es posible construir instrumentos de cuadro móvil para mediciones de CA. Los únicos instrumentos electromagnéticos que sirven en CA son los electrodinamómetros, y los de repulsión de imanes.

EFECTO TÉRMICO. Los conductores se calientan al paso de una corriente, sea CC o CA. En consecuencia, los instrumentos de medida basados en el efecto térmico sirven para ambas corrientes.

Intensidad eficaz de una CA

A todo esto, cabe preguntarse: ¿qué valor de la intensidad se mide cuando se intercala un amperímetro en un circuito de CA? Evidentemente, ningún amperímetro podrá medir la intensidad instantánea, ni la intensidad máxima (que no es sino un valor instantáneo).

Para saber qué intensidad mide un amperímetro de CA, se calcula la cantidad de calor producida al paso de la corriente que, según la ley de Joule, es:

$$Q = 0{,}24\ R\ I^2\ t$$

Pero de nuevo se presenta el problema: ¿cuál es la I que figura en la ley de Joule? La solución resulta de que *experimentalmente* se comprueba que la cantidad de calor producida por la corriente alterna es igual a la *mitad* de la cantidad de calor que produciría una CC cuya intensidad fuera igual a la intensidad máxima I_0 de la CA. De acuerdo con la ley de Joule, esa cantidad de calor vale

$$Q = \frac{1}{2}\,0{,}24\ R\ I_0^2\ t = 0{,}24\ R\frac{I_0^2}{2}\ t$$

de donde resulta:

$$I = \frac{I_0^2}{2}$$

o sea:

$$\boxed{I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}}$$

Esta intensidad I (que *no* es el promedio de las intensidades), se llama *intensidad eficaz* de la CA. Su significado físico es el siguiente: al pasar una CA por un conductor desprende tanto calor como una CC cuya intensidad fuera igual a la intensidad eficaz I de la CA. Por lo tanto:

En corriente alterna, lo que mide un amperímetro es la intensidad eficaz de la corriente.

EJEMPLO: *Calcular la intensidad eficaz I de una CA de intensidad máxima $I_0 = 10$ A. ¿Qué cantidad de calor produce esa CA en una resistencia de 100 Ω en 5 minutos?*

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{10\ A}{\sqrt{2}} \cong 7{,}07\ A$$

$$Q = 0{,}24\ R\ I^2\ t = 0{,}24 \cdot 100\ \Omega \cdot \left(\frac{10\ A}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot 300^s =$$

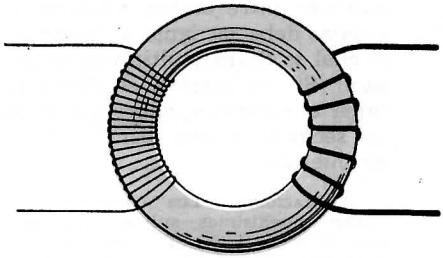
$$= 0{,}24 \cdot 100 \cdot \frac{100}{2} \cdot 300\ cal = 360\,000\ cal$$

F. e. m. eficaz de una CA

¿Qué mide un voltímetro de CA? Como el amperímetro, un voltímetro de CA mide el *valor eficaz de la f. e. m.*, o de una caída de potencial. Llamándolo E ese valor eficaz vale:

$$\boxed{E = \frac{E_0}{\sqrt{2}}}$$

Transformador



Esquema de un transformador.

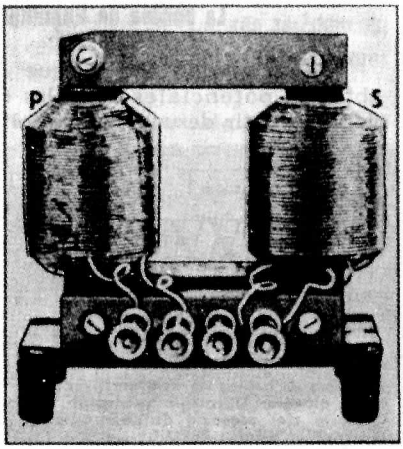
El transformador es un aparato que de una corriente alterna de determinada tensión, permite obtener otra corriente alterna de distinta tensión. En esencia, consiste en un núcleo de hierro en el que por una parte se hace un arrollamiento con el cable por donde circula la corriente alterna cuya tensión se quiere transformar (primario), y por otra se hace otro arrollamiento, de donde se obtendrá la corriente alterna a la tensión deseada (secundario). El núcleo de hierro constituye un circuito magnético, por el cual las variaciones de flujo se realizan con facilidad.

La relación entre la f. e. m. V_p del primario y la V_s del secundario depende del número de vueltas de cada arrollamiento. En efecto: por el principio de conservación de la energía, la potencia del secundario debe ser igual a la del primario:

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

Obsérvese que si en el secundario se obtiene una f. e. m. más elevada que la del primario, la intensidad de la corriente que lo recorre es menor que la del primario: se gana en f. e. m. y se pierde en intensidad, o viceversa.

La relación entre la f. e. m. del primario y la del secundario es la siguiente:

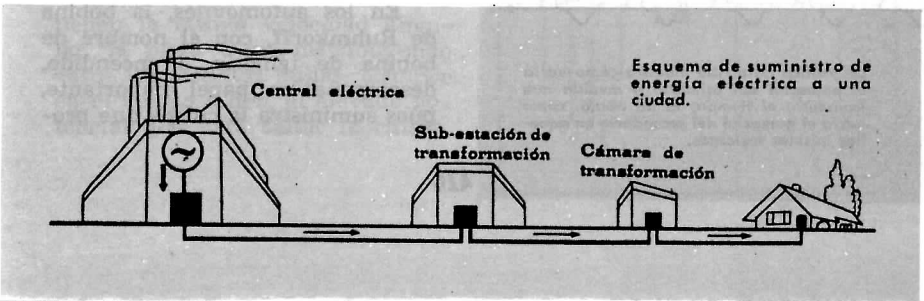


Modelo experimental de transformador.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

(N, número de vueltas)

Por lo tanto si se quiere un transformador para obtener una f. e. m. mayor que la del primario, el secundario debe tener mayor

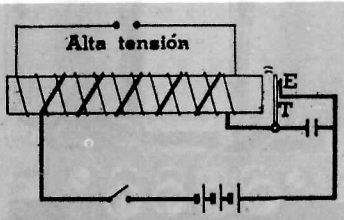


número de vueltas que aquél, y el cociente entre ambos números de vueltas debe ser igual al factor por el cual se desea multiplicar la tensión. Si, en cambio, se desea reducir el potencial, habrá que hacer un secundario con menor número de vueltas.

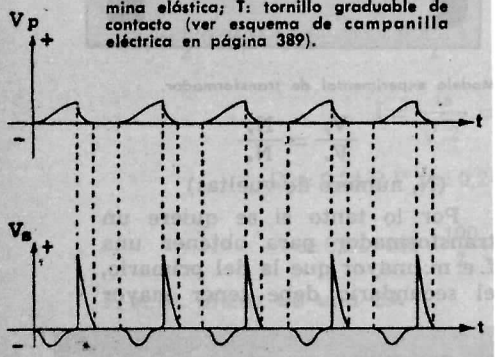
APLICACIONES: Los transformadores tienen muchísimas aplicaciones, entre ellas la transmisión de energía eléctrica a grandes distancias, pues es más económico transmitirla a alta tensión y baja intensidad.

La bobina de Ruhmkorff

Es un aparato con el que se obtienen potenciales de miles de volts, a partir de unos pocos volts.



Esquema de bobina de Ruhmkorff. E: lámina elástica; T: tornillo graduable de contacto (ver esquema de campanilla eléctrica en página 389).



La gráfica de arriba muestra cómo varía el potencial del primario a medida que transcurre el tiempo; la de abajo, cómo varía el potencial del secundario en aquellos mismos instantes.

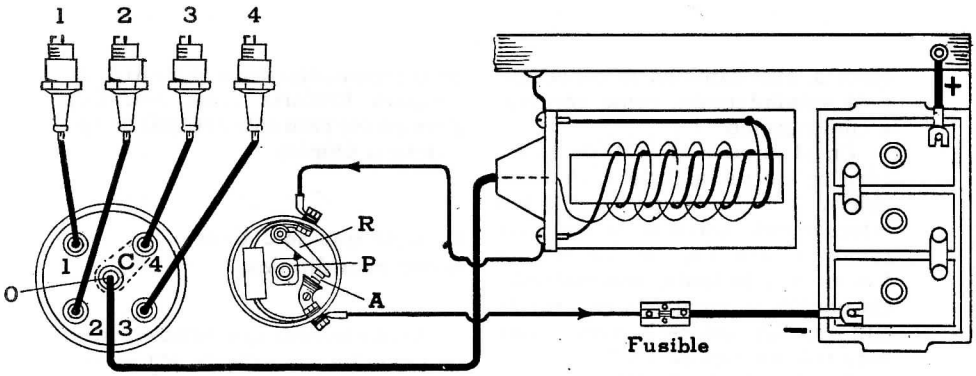
Consiste en un núcleo de hierro dulce común a dos arrollamientos: el primario, constituido por un centenar de vueltas de alambre grueso (1 ó 2 mm de diámetro), y el secundario, con varios miles de vueltas de alambre fino (0,1 ó 0,2 mm).

El primario se conecta a un generador de generalmente 6 V, y se pueden obtener potenciales de miles de volts en el secundario.

En la gráfica se han representado (en distintas escalas), las variaciones del potencial del primario en la parte superior, y del secundario, en la inferior. Obsérvese que cuando el potencial del primario crece (pues el circuito se está abriendo y cerrando continuamente, mediante un dispositivo análogo al interruptor del timbre), en el secundario se produce una f. e. m. inducida de sentido opuesto. Al disminuir bruscamente la intensidad en el primario, en el secundario aparece una f. e. m. de sentido opuesto al anterior y de elevado potencial, pues la disminución de la corriente –y con ello la disminución del flujo magnético– ha sido rapidísima, más que en el cierre. Por eso, a pesar de que hay f. e. m. en uno y otro sentido, puede atribuirse una polaridad a los bornes del secundario de la bobina.

La bobina de ignición

En los automóviles, la bobina de Ruhmkorff, con el nombre de bobina de ignición o encendido, desempeña un papel importante, pues suministra la chispa que pro-



Esquema de la bobina de ignición del motor de un automóvil de 4 cilindros.

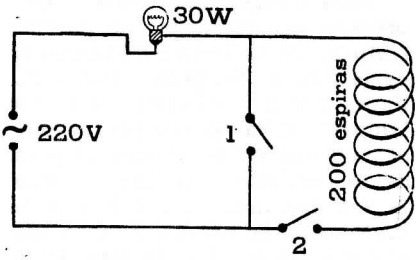
duce el encendido de la mezcla gaseosa en cada cilindro.

La batería de acumuladores suministra la corriente para el primario de la bobina. La pieza P, de forma prismática, de aristas redondeadas, gira con la misma velocidad que el contacto C del distribuidor alrededor de su eje O. Cuando la punta que lleva la palanca R está tocando una de las caras del prisma, en A ("los platinos") hay contacto eléctrico y la corriente circula por el primario; cuando la punta que lleva R está tocando una de las aristas redondeadas de P, se levanta la pieza R, y el contacto en A se interrumpe, como puede verse en el esquema. Con ello deja de circular corriente por el primario, y la variación de flujo a través del secundario genera en él una f. e. m. inducida de alto potencial. Pero en ese instante, la pieza C del distribuidor está en contacto con una de las cuatro bujías, y en ésta salta una chispa.

Como los movimientos de P y C tienen la misma velocidad angular, la pieza C va distribuyendo entre las distintas bujías, siempre en el mismo orden, el elevado potencial que hará saltar la chispa.

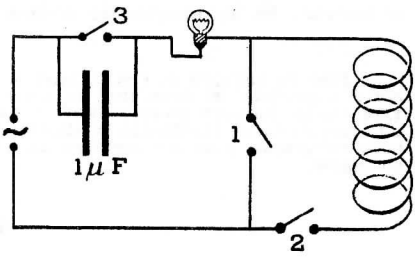
Circuitos de C. A. con resistencias, solenoides y condensadores

El problema de calcular la intensidad de un circuito de CA es más complicado que el de CC, porque no sólo influye la resistencia



Instalación para observar el efecto que produce una autoinducción en un circuito.

Instalación para observar el efecto de una bobina y un condensador, actuando juntos o separadamente.



óhmica, sino también la capacidad y la autoinducción, como veremos a continuación.

En el circuito de CA de la figura se cierra la llave 1, dejando abierta la 2. La lámpara brilla tan intensamente como si la conectáramos a una CC de la misma f. e. m. Por lo tanto, una resistencia óhmica se comporta en un circuito de CA casi de la misma manera que en uno de CC*.

Se abre luego la llave 1 y se cierra la 2, de modo que la bobina, de gran autoinducción, ahora actúa. Se observa que la lámpara brilla menos que antes, lo que prueba que la autoinducción de la bobina hace disminuir la intensidad de la corriente.

Como consecuencia, para variar la I de una CA puede emplearse, en lugar de un reóstato, una bobina de autoinducción variable.

Para comprobar el efecto que produce una capacidad en un circuito de CA se instala uno como el de la figura. Primero abrimos las llaves 2 y 3 y cerramos la 1. La lámpara brilla, lo que prueba que el condensador no impide el paso de la corriente. Después abrimos la 1 y cerramos la 2 y 3, con lo cual actúa la bobina y no actúa el condensador. La lámpara brilla poco, debido a la autoinducción. Abrimos la 3, y el condensador entra en funciones: la lámpara brilla más que antes.

En consecuencia, *el condensador elimina, en parte, el efecto de la bobina.* Si los efectos de ambos se compensaran exactamente, la lámpara brillaría como con CC, pues en ese caso sólo actuaría la resistencia óhmica.

Circuito que sólo tiene resistencia óhmica

Analizaremos qué ocurre cuando una f. e. m. alterna actúa solamente sobre una resistencia óhmica pura, es decir, cuando en el circuito no hay ni autoinducción ni capacidad. Esto no es sencillo: en la práctica, todos los conductores tienen autoinducción y capacidad. Pero debemos suponerlo así, para simplificar nuestro estudio.

Como la f. e. m. varía en cada instante, también debe variar en cada instante la intensidad. Según la ley de Ohm, el valor instantáneo de la intensidad se obtiene dividiendo el valor instantáneo correspondiente de la f. e. m. por la resistencia óhmica; es decir

$$i = \frac{e}{R},$$

Como

$$e = E_0 \operatorname{sen} \omega t,$$

resulta

$$i = \frac{E_0}{R} \operatorname{sen} \omega t;$$

E_0 es el valor máximo de la f. e. m.; el cociente entre E_0 y R da el valor máximo de la intensidad, que llamaremos I_0.

* Esto no siempre es cierto, pues si la CA es de alta frecuencia, se transmite por la superficie del conductor, en lugar de hacerlo por el interior, como en la CC. Este efecto, llamado efecto "Skin" o pelicular, explica por qué las corrientes de alta frecuencia se transmiten mediante conductores huecos, y también por qué son poco peligrosas, pues no penetran en el cuerpo. (La palabra *skin* significa piel, en inglés.)

Por lo tanto, como $I_o = \frac{E_o}{R}$,

$$\boxed{i = I_o \operatorname{sen} \omega t}$$

Fórmula con la que podemos calcular la intensidad que en cada instante recorre el circuito. Como se ve, i también varía sinusoidalmente, en un todo de acuerdo con e.

$$\left.\begin{array}{ll} \text{Como} & \omega = \dfrac{2\pi}{T} \\ \text{y} & T = \dfrac{1}{f} \end{array}\right\} \therefore\ \omega = 2\pi f, \quad \text{siendo } f \text{ la frecuencia,}$$

$$\therefore\ \boxed{i = I_o \operatorname{sen} 2\pi f t}$$

y de esta manera hemos expresado la intensidad de la CA en función de la frecuencia. Ésta se mide en ciclos por segundo, y en sus múltiplos conocidos: kilociclo/s (1 000 ciclos/s); megaciclo (1 000 000 ciclos/s), etc. La corriente urbana es de 50 ciclos/s.

EJEMPLO: *Sobre una resistencia de 100 Ω actúa una f.e.m. alterna cuyo valor máximo vale 200 V y su frecuencia $f = 50$ ciclos/s. Calcular:* a) *la intensidad máxima de la corriente;* b) *su frecuencia y su período;* c) *sus valores instantáneos en los instantes* $\frac{1}{25}$ *s y* $1\frac{1}{3}$ *s.*

a) $I_o = \dfrac{E_o}{R} = \dfrac{200\ \text{V}}{100\ \Omega} = 2\ \text{A}$;

b) $f = 50\ \text{c/s} \therefore\ T = \dfrac{1^s}{50} = 0{,}02^s$;

c) $i = I_o \cdot \operatorname{sen} 2\pi f t$;

$i_1 = 1\ \text{A} \cdot \operatorname{sen}\left(2\pi \cdot 50 \cdot \dfrac{1}{25}\right)$;

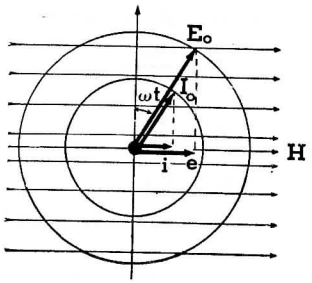
$i_1 = 1\ \text{A} \cdot \operatorname{sen} 4\pi = 0$;

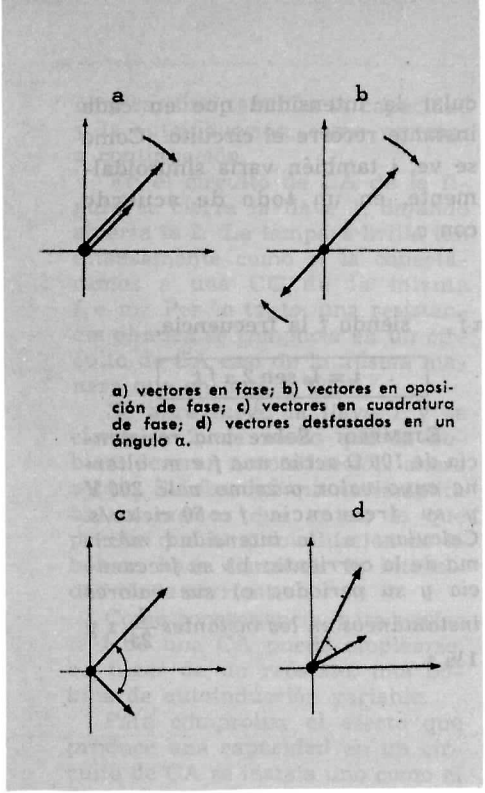
$i_2 = 1\ \text{A} \cdot \operatorname{sen}\ (2\pi \cdot 50 \cdot 1\frac{1}{3}\text{s}) = 1\ \text{A} \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} = 1\ \text{A} \cdot 0{,}5 = 0{,}5\ \text{A}$

Represéntese gráficamente la ecuación y calcúlense otros valores de i.

En un circuito que sólo tiene resistencia óhmica, sin autoinducción ni capacidad, la f.e.m. y la intensidad de la corriente están en fase.

REPRESENTACIÓN DE i MEDIANTE UN VECTOR GIRATORIO. Como el flujo y la f. e. m., la intensidad instantánea puede representarse mediante un vector giratorio, que gire con la velocidad angular ω, y cuya longitud represente la intensidad máxima I_o.





a) vectores en fase; b) vectores en oposición de fase; c) vectores en cuadratura de fase; d) vectores desfasados en un ángulo α.

Si en un mismo diagrama representamos el vector representativo de E_0 y el vector representativo de I_0, como ambos giran con la misma velocidad angular y parten del mismo punto inicial, ambos se acompañan en su rotación. Y aquí aprendemos algo nuevo: cuando dos vectores giratorios forman un ángulo entre sí, se dice que entre ellos existe una *diferencia de fase*, o simplemente que están *desfasados*; el ángulo entre ellos mide el defasaje. En nuestro caso, el ángulo de fase vale *cero*, y entonces se dice que ambos vectores *están en fase*; cuando el ángulo vale 180°, los vectores están en *oposición de fase*; cuando vale 90°, *están en cuadratura*.

En nuestro caso, por ejemplo, *i* y *e* están en fase. Su representación gráfica es una sinusoide, de amplitud E_0 para la *e* y amplitud I_0 para la *i*. Esto ayuda a comprender que cuando las dos magnitudes están en fase y una se anula, la otra también se anula; cuando una alcanza su valor máximo, la otra también, etc. Y esto ocurre con *e* y con *i* en el caso de un circuito que sólo tiene resistencia óhmica, pero no capacidad ni autoinducción.

En consecuencia: *la intensidad de una CA que atraviesa solamente una resistencia óhmica está en fase con la f. e. m. alterna que la produce.*

Resumiendo: en un circuito que sólo tiene resistencias óhmicas (sin capacidad ni autoinducción), se cumple que:

$$i = I_0 \operatorname{sen} \omega t = \frac{E_0}{R} \operatorname{sen} \omega t \qquad \text{(intensidad instantánea)}$$

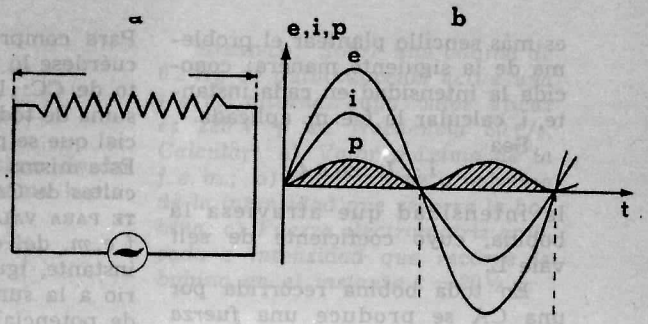
$$e = E_0 \operatorname{sen} \omega t \qquad \text{(f. e. m. instantánea)}$$

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \qquad \text{(intensidad eficaz)}$$

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \qquad \text{(f. e. m. eficaz)}$$

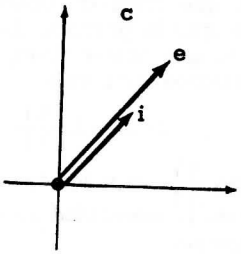
$$P = E\,I \qquad \text{(potencia eficaz)}$$

$$p = e \cdot i = E_0\, I_0 \operatorname{sen}^2 \omega t \qquad \text{(potencia instantánea)}$$



a) Esquema de circuito que sólo tiene resistencia óhmica.
b) Cómo varían la f.e.m., la intensidad y la potencia.
c) La f.e.m. y la intensidad están en fase.

EJEMPLO: *Una f. e. m. alternada de valor eficaz E = 100 V, actúa sobre una resistencia óhmica de 50 Ω. Calcular:* a) *Valor máximo de la f. e. m.* b) *Valor máximo I_0 y eficaz I de la intensidad;* c) *Potencia consumida por el generador.*



$$a)\quad E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \therefore\ E_0 = E\sqrt{2} = 100\ V \cdot 1{,}41 = 141\ V$$

$$b)\quad I_0 = \frac{E_0}{R} = \frac{141\ V}{50\ \Omega} = 2{,}82\ A$$

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{2{,}82}{\sqrt{2}} = 2\ A$$

c) En cuanto al cálculo de la potencia, recordemos que en CC se halla multiplicando la f. e. m. por la intensidad; en CA también, pero como tenemos tres clases de f. e. m. y de intensidad, obtendremos tres clases de potencia:

potencia instantánea: $p = e\,i$
potencia eficaz: $P = E\,I$
potencia máxima: $P_0 = E_0\,I_0$

La potencia que permite calcular el trabajo o el gasto consumido por un aparato es la potencia eficaz. En nuestro problema:

$$P = E \cdot I = 100\ V \cdot 2\ A = 200\ \omega$$

Circuito que sólo tiene autoinducción

Sabiendo qué ocurre cuando una f. e. m. alterna actúa sobre una resistencia óhmica, veremos qué pasa cuando en el circuito hay *solamente una bobina que no tiene resistencia óhmica ni capacidad, sino exclusivamente autoinducción.* Se las llama generalmente "bobinas con self".

En lugar de calcular la intensidad que produce en la bobina una determinada f. e. m. alternada,

es más sencillo plantear el problema de la siguiente manera: conocida la intensidad en cada instante, i, calcular la f. e. m. aplicada.

Sea

$$i = I_0 \operatorname{sen} \omega t$$

la intensidad que atraviesa la bobina, cuyo coeficiente de self vale L.

En toda bobina recorrida por una CA se produce una *fuerza contraelectromotriz de autoinducción*, que trata de oponerse a la causa que la provoca. De acuerdo con lo que hemos visto, esa fuerza electromotriz vale

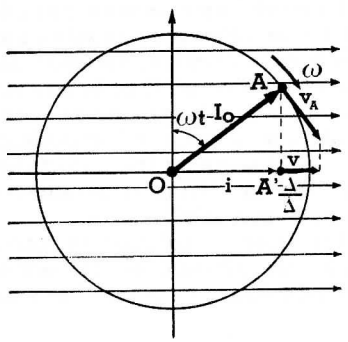
$$e_L = - L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

siendo $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ la velocidad de variación de la intensidad que atraviesa la bobina.

Pero la intensidad i es generada por la f. e. m. e del alternador. En cada instante, la fuerza contraelectromotriz producida por la self en la bobina es igual y contraria a la f. e. m. del alternador. Es decir:

$$e = - e_L$$

La velocidad con que varía la i es la velocidad con que se mueve A, el extremo del vector que la representa.



Para comprender mejor esto, recuérdese lo que pasa en un circuito de CC: la f. e. m. es igual a la suma de todas las caídas de potencial que se producen en el circuito. Esta misma regla vale para los circuitos de CA, pero EXCLUSIVAMENTE PARA VALORES INSTANTÁNEOS: *la f. e. m. del alternador* es, en cada instante, igual y de signo contrario a la suma de todas las caídas de potencial que se produzcan en el circuito. Pero en un circuito de CA, las caídas de potencial son debidas no sólo a las resistencias óhmicas (caídas óhmicas), sino también a las autoinducciones (caídas inductivas) y a las capacidades (caídas capacitivas).

En nuestro caso, sólo hay caída inductiva o fuerza contraelectromotriz producida por la self, pues hemos supuesto que la bobina sólo tiene self. Por lo tanto,

$$e = - e_L ,$$

y en consecuencia,

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \qquad (1)$$

Para calcular cuánto vale e, debemos saber calcular $\frac{\Delta i}{\Delta t}$. Representando a i por su vector giratorio, $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ es la proyección v de la velocidad v_A con que se mueve el extremo A del vector. En consecuencia, y de acuerdo con la figura,

$$v = \frac{\Delta i}{\Delta t} = v_A \cos \omega t ,$$

pero

$$v_A = \omega \cdot OA = \omega I_0$$

$$\therefore \frac{\Delta i}{\Delta t} = \omega I_0 \cdot \cos \omega t \qquad (2)$$

De (1) y (2):

$$e = \omega L I_0 \cos \omega t$$

$\omega L I_0$ es el valor máximo de la f. e. m., y llamándola, como hasta ahora, E_0,

$$e = E_0 \cos \omega t$$

EJEMPLO: *Sobre una bobina de 0,2 Hy de autoinducción actúa una f. e. m. alterna, cuyo valor eficaz es 220 V y su frecuencia 60 c/s. Calcular:* a) *Valor máximo de la f. e. m.;* b) *Valor eficaz y máximo de la intensidad que recorre la bobina;* c) *Fuerza electromotriz aplicada e intensidad que recorre la bobina en el instante* $t = 20\frac{1}{8}$ *s.*

a) Como

$$E = 220 \text{ V}$$
$$E_0 = E\sqrt{2} = 220 \text{ V} \cdot 1{,}41 ;$$
$$E_0 \cong 310 \text{ V}$$

b) Como

$$E_0 = \omega L I_0 , \quad \omega = 2\pi f \therefore$$
$$\therefore \; I_0 = \frac{E_0}{\omega L} = \frac{310 \text{ V}}{2\pi f \cdot 0{,}2 \text{ Hy}} ;$$
$$I_0 = \frac{310 \text{ V}}{2\pi \cdot 60 \frac{c}{s} \cdot 0{,}2 \text{ Hy}}$$
$$I_0 \cong 4{,}1 \text{ A}$$

Por lo tanto:

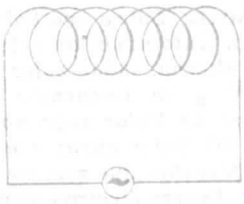
$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{4{,}1 \text{ A}}{\sqrt{2}} \cong 2{,}9 \text{ A}$$

c) $e = E_0 \cos \omega t = 310 \text{ V} \cdot \cos 2\pi \cdot 60 \cdot 20\frac{1}{8}$ s,

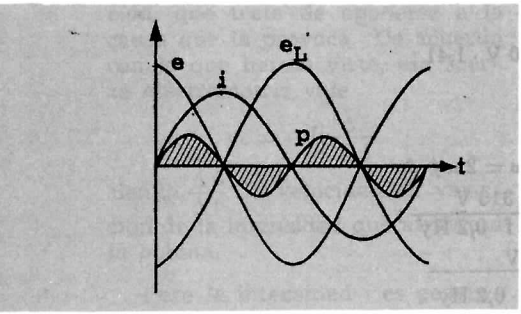
pero $20\frac{1}{8}\text{s} = \frac{161}{8}\text{s} \therefore$

$$e = 310 \text{ V} \cdot \cos 2\pi \cdot 60 \cdot \frac{161}{8}$$
$$e = 310 \cdot \cos 2\,415\,\pi ; \quad \text{pero} \quad \cos 2\,415\,\pi = \cos \pi = -1$$
$$\therefore \; e = -310 \text{ V}$$
$$i = I_0 \operatorname{sen} \omega t$$
$$i = 4{,}1 \text{ A} \operatorname{sen} 2\pi \cdot 60 \cdot \frac{161}{8} = 4{,}1 \text{ A} \operatorname{sen} 2\,415\,\pi$$
pero $\operatorname{sen} 2\,415\,\pi = \operatorname{sen} \pi = 0$
$\therefore \; i = 0$

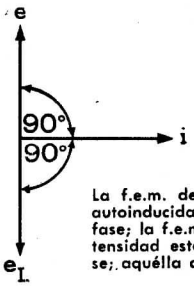
Por lo tanto, en el instante en que la f. e. m. aplicada a la bobina vale -310 V, la i producida vale *cero.*



Esquema de un circuito que incluye sólo bobinas con autoinducción, sin resistencias óhmicas ni capacidades.



Cómo varían la f.e.m. del generador, la f.e.m. autoinducida, la intensidad de la corriente que recorre el circuito y la potencia consumida.



La f.e.m. del generador y la f.e.m. autoinducida están en oposición de fase; la f.e.m. del generador y la intensidad están en cuadratura de fase; aquélla adelantada 90°.

Inductancia o reactancia inductiva de una bobina

Como enseña el ejercicio anterior, la ley de Ohm no puede aplicarse a los valores instantáneos de *e* y de *i*. Pero sí puede hacerse, y así lo hemos hecho, para los valores máximos y para los valores eficaces. Así como en una resistencia óhmica el cociente entre E e I da la resistencia óhmica R, en una bobina ese cociente vale

$$\frac{E_0}{I_0} = \omega L$$

ωL se llama *inductancia* o *reactancia inductiva* de la bobina, y se la representa con el símbolo X_L. Como E_0 se mide en volts, e I_0 en amperes, X_L se mide en ohms, al igual que la resistencia óhmica. Es interesante observar que X_L no depende únicamente del coeficiente de autoinducción de la bobina, sino también de la frecuencia de la CA que circula por ella.

De acuerdo con todo esto podemos decir: *el valor máximo de i que atraviesa una bobina en CA se obtiene dividiendo el valor máximo de la f. e. m. aplicada por la inductancia de la bobina.*

$$I_0 = \frac{E_0}{L\,\omega}$$

Como se ve, la inductancia representa la resistencia que encuentra la corriente para recorrer el circuito en que sólo hay una autoinducción. Por eso se la llama también reactancia inductiva.

REPRESENTACIONES GRÁFICAS. De acuerdo con las fórmulas obtenidas, la representación gráfica de *e* es una *cosinusoide* de amplitud $I_0\,\omega\,L$; y la de *i*, una *sinusoide* de amplitud I_0.

Haciendo la representación vectorial, se observa que los dos vectores giratorios correspondientes no están en fase, sino que forman entre sí un ángulo de 90°: están, pues, en cuadratura, ¿qué

significa esto? Pues que cuando la f. e. m. es máxima, la intensidad es nula; cuando la f. e. m. es nula, la intensidad es máxima, etc. Comparando la sinusoide y la cosinusoide, se observa perfectamente el desacuerdo entre ambas magnitudes. Como en el instante inicial e tiene su valor máximo, mientras que la intensidad es nula, se acostumbra decir que e está *adelantada* 90° respecto de i. De acuerdo con esto, puede resumirse el efecto de una self en CA de la siguiente manera: *Una bobina sobre la que actúa una f. e. m. alternada es recorrida por una corriente atrasada 90° con respecto a la f. e. m.*

POTENCIA CONSUMIDA EN UNA SELF. Para calcular la potencia instantánea consumida en CA deben multiplicarse los valores instantáneos correspondientes de e y de i. Gráficamente se obtiene una sinusoide, de período mitad que el de la i. En el primer cuarto de período, la intensidad de la corriente aumenta; el generador entrega energía al circuito; pero en el cuarto de período siguiente, esa misma energía es devuelta. ¿Qué ocurrió con la energía entregada? Pues que no se consumió, sino que se transformó en energía magnética almacenada por la bobina; en el siguiente cuarto de período, la *self* devuelve esa misma cantidad, transformándose la energía magnética en eléctrica; y así sucesivamente. Por lo tanto, la *energía media* consumida en un período de *cero*. En otras palabras: *una self no consume energía*. Lo que ocurre en ella es análogo a lo que ocurre en el péndulo donde la energía mecánica es siempre constante, y sólo hay transformaciones de energía potencial en cinética, y viceversa.

En páginas anteriores hemos dicho que en CA las bobinas pueden emplearse como resistencias, pero ahora vemos que presentan una ventaja fundamental sobre las resistencias, ya que éstas bloquean la corriente desperdiciándola, puesto que la transforman en calor. En cambio, en una bobina de autoinducción el consumo de energía es *cero*. Naturalmente, siempre se pierde *algo* de energía, porque todas las bobinas poseen *cierta* resistencia óhmica; de todos modos, es mucho menor que lo que se pierde en una resistencia.

Resumiendo: en un circuito que sólo tiene autoinducción, sin resistencias óhmicas ni capacidades, se cumple que:

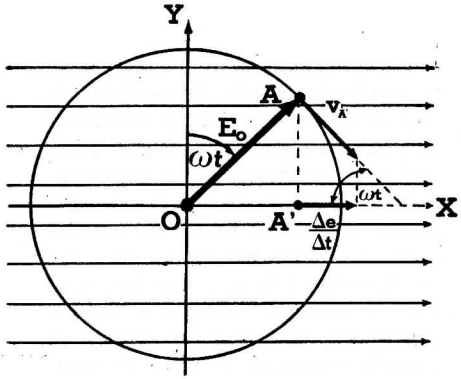
$$i = I_0 \operatorname{sen} \omega t \qquad \text{(intensidad en cada instante);}$$

$$e = E_0 \cos \omega t \qquad \text{(f. e. m. en cada instante);}$$

$$I_0 = \frac{E_0}{\omega L} \therefore \omega L = \frac{E_0}{I_0} \qquad \text{(inductancia de la bobina);}$$

$$P = 0 \qquad \text{(potencia media);}$$

$$p = e \cdot i = E_0 \operatorname{sen} \omega t \cdot \cos \omega t \qquad \text{(potencia en cada instante).}$$



La velocidad con que varía la e es la velocidad con que se mueve A', el extremo del vector que la representa.

Circuito con capacidad solamente

En varias oportunidades hemos dicho que un condensador bloquea una CC pero deja pasar una CA. En realidad, la CA *no atraviesa* el condensador; lo que ocurre es que la diferencia de potencial entre las placas del condensador es, en cada instante, igual a la f. e. m. aplicada, y como ésta varía, el condensador se carga, descarga y vuelve a cargarse continuamente. Esas corrientes de carga y descarga son las que circulan por el circuito, y, por ejemplo, pueden mantener encendida una lamparita eléctrica.

Si en un lapso Δt ha circulado por el circuito una carga Δq, la intensidad de la corriente es, por definición,

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Como la carga q, la capacidad C del condensador, y la diferencia de potencial e entre sus placas están vinculadas por la fórmula

$$q = C \cdot e\,,$$

esa carga Δq que ha llegado al condensador, o salido de él, en el lapso Δt, provoca una variación Δe de la diferencia de potencial entre placas, y se cumple que:

$$\Delta q = C \cdot \Delta e$$

Por lo tanto,

$$i = \frac{C \cdot \Delta e}{\Delta t} = C \frac{\Delta e}{\Delta t} = \qquad (1)$$

Ahora debemos calcular el cociente $\frac{\Delta e}{\Delta t}$, que es la velocidad con que varía la diferencia de potencial entre las placas del condensador, o, lo que es lo mismo, la velocidad con que varía la f. e. m. del generador de CA. Para ello recurrimos nuevamente a los vectores giratorios: $\frac{\Delta e}{\Delta t}$ es la proyección sobre el eje OX de la velocidad v_A con que se mueve la punta del vector $OA = E_0$,

$$\frac{\Delta e}{\Delta t} = v_A \cos \omega t$$

Como

$$v_A = \omega \cdot OA, \quad \text{y} \quad OA = E_0, \quad \text{es:} \quad v_A = \omega E_0$$

Luego,

$$\frac{\Delta e}{\Delta t} = \omega E_0 \cdot \cos \omega t \qquad (2)$$

De (1) y (2): $\boxed{i = C \omega E_0 \cdot \cos \omega t}$ $\therefore$ $\boxed{I_0 = C \omega E_0}$

EJEMPLO: *Sobre un condensador* $C = 2\ \mu F$ *actúa una f. e. m. de valor eficaz* $E = 100\ V$ *y de frecuencia* $f = 60$ *ciclos. Calcular:* a) *Los valores: eficaz, I, y máximo,* I_0, *de la intensidad;* b) *los valores instantáneos* i *y* e *en el instante* $t = 10\ \frac{1}{7}$ *segundos.*

a) $\left.\begin{aligned} I_0 &= C\,\omega\,E_0 \\ E_0 &= E\cdot\sqrt{2} \\ \omega &= 2\,\pi\,f \end{aligned}\right\} \therefore\ I_0 = C\cdot 2\,\pi\,f\cdot E\,\sqrt{2}$

$$I_0 = 2\ \mu F\cdot 2\,\pi\,60\,\frac{1}{s}\cdot 100\ V\cdot 1{,}41 =$$

$$= 2\cdot 10^{-6}\ F\cdot 120\,\pi\,\frac{1}{s}\cdot 141\ V \cong 0{,}1\ A$$

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = C\cdot 2\,\pi\,f\cdot E \cong 0{,}07\ A$$

b) $e = E_0\ \text{sen}\ \omega\,t = E\ \sqrt{2}\cdot \text{sen}\ 2\,\pi\,f\,t =$

$$= 100\ V\cdot 1{,}41\cdot \text{sen}\left(2\,\pi\cdot 60\cdot 10\,\frac{1}{7}\right) \qquad (1)$$

Pero $\text{sen}\left(2\,\pi\cdot 60\cdot 10\,\frac{1}{7}\right) = \text{sen}\left(\frac{600}{7}\cdot 2\,\pi\right) = \text{sen}\ 30\ 857° \cong$

$$\cong \text{sen}\ 257° \cong -0{,}974$$

De (1) y (2)

$e = 100\ V\cdot 1{,}41\cdot(-0{,}974) \cong -137\ V$ $\qquad e = -137\ V$

$i = I_0 \cos\omega\,t = 0{,}1\ A\cdot\cos 257° = 0{,}1\ A\cdot(-\cos 137°) \cong$

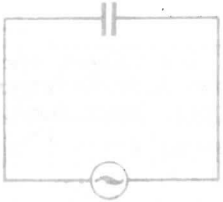
$\cong 0{,}1\ A\cdot(-0{,}225) = -257\ A$ $\qquad i = -0{,}057\ A$

Capacitancia o reactancia capacitativa de un condensador

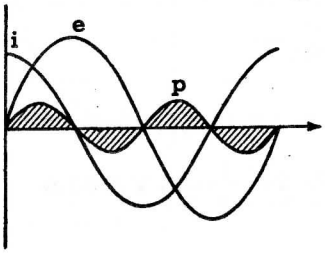
Como enseña el ejercicio anterior, la ley de Ohm no puede aplicarse a los valores instantáneos de *e* y de *i*. Pero sí puede hacerse, y así lo hemos hecho, para los valores máximos y eficaces. Así como en una resistencia óhmica el cociente entre E e I es la resistencia óhmica R, y en una bobina ese mismo cociente es la inductancia L, en un condensador ese cociente vale

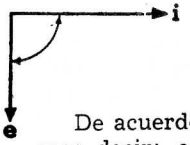
$$\frac{E}{I} = \frac{1}{C\,\omega}$$

$\frac{1}{C\,\omega}$ se llama *capacitancia* o *reactancia capacitativa* del condensador, y se la representa con el símbolo X_C. Como E_0 se mide en volts e I_0 en amperes, X_C se mide en ohms, como la resistencia óhmica y como la inductancia. Es interesante observar que X_C no depende únicamente de la capacidad del condensador, sino también de la *frecuencia* de la CA que circula por él.



Esquema de un circuito con capacidad y sin resistencia óhmica ni autoinducción.





La f.e.m. y la intensidad también están en cuadratura de fase, pero es la i la que está 90° adelantada.

De acuerdo con todo esto podemos decir: el valor máximo de i que atraviesa un condensador en CA se *obtiene dividiendo el valor máximo de la f. e. m. aplicada por la capacitancia del condensador.*

$$I_0 = \frac{E_0}{\frac{1}{C\omega}} = E_0 \cdot C\omega$$

REPRESENTACIONES GRÁFICAS. De acuerdo con las fórmulas obtenidas, la representación gráfica de e es una sinusoide de amplitud E_0, y la de i, una cosinusoide de amplitud I_0.

$$e = E_0 \operatorname{sen} \omega t$$

$$i = I_0 \cos \omega t$$

$$I_0 = \frac{E_0}{\frac{1}{C\omega}} \quad \therefore \quad \frac{1}{C\omega} = \frac{E_0}{I_0}$$

(capacitancia)

$$P = 0$$

(potencia media);

$$p = e \cdot i = E_0 \cdot I_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t \cos \omega t$$

(potencia en cada instante)

Haciendo la representación vectorial, los vectores giratorios correspondientes no están en fase, sino que forman entre sí un ángulo de 90°; están, pues, en cuadratura. Como se ve, esto es muy semejante a lo que ocurre en el caso de una bobina, pero con una diferencia fundamental: ahora i está *adelantada* 90° respecto de e, mientras en la bobina, e está adelantada respecto de i.

POTENCIA CONSUMIDA EN UN CONDENSADOR. Multiplicando los valores instantáneos de e y de i se obtienen los valores instantáneos de la potencia consumida; gráficamente, se obtiene una sinusoide de período mitad que el de e. En consecuencia, la potencia instantánea resulta alternativamente positiva y negativa, cada cuarto de período de e. Obtenemos el mismo resultado que en el caso de una bobina. Por lo tanto, tampoco un condensador consume energía, porque en el primer cuarto de período, el generador entrega energía al condensador, que éste almacena en forma de energía electrostática, y en el siguiente cuarto de período, el condensador devuelve esa misma cantidad de energía.

En resumen: en un circuito con capacidad, y sin resistencias óhmicas ni autoinducciones, se cumple que:

(f. e. m. en cada instante)

(intensidad en cada instante);

Circuitos con R, L y C

En la práctica, en todo circuito hay resistencia, inductancia y capacitancia simultáneamente, aunque sus valores pueden ser muy pequeños. Pero si la frecuencia es muy elevada, como en los circuitos radiotelefónicos, la inductancia (ω L) y la capacitancia $\left(\frac{1}{C\,\omega}\right)$ pueden tomar valores considerables.

Consideraremos el caso en que la resistencia, la bobina y la capacidad están en serie. Supongamos que la intensidad en determinado instante sea:

$$i = I_0 \operatorname{sen} \omega t$$

A lo largo de cada uno de los elementos del circuito hay caídas de potencial que nosotros sabemos calcular, y que son:

caída óhmica en la resistencia:

$$V_R = V_0 \operatorname{sen} \omega t = I_0 R \operatorname{sen} \omega t$$

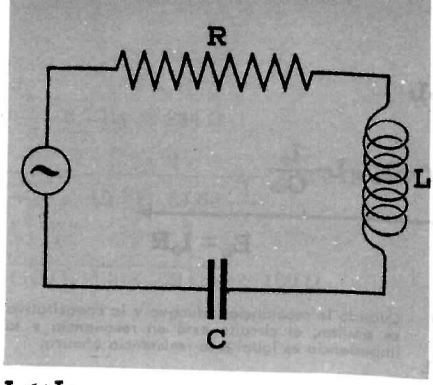
caída inductiva en la bobina:

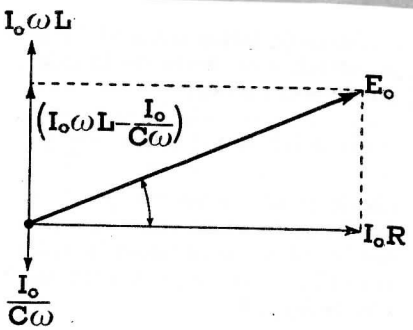
$$V_L = V_0 \cos \omega t = I_0 \omega L \operatorname{sen} (90^\circ + \omega t)$$

caída capacitativa en la capacidad:

$$V_C = E_0 \operatorname{sen} (\omega t - 90^\circ) = \frac{I_0}{C\,\omega} \operatorname{sen} (\omega t - 90^\circ)$$

En V_C, el argumento está disminuido en 90°, porque sabemos que la caída está atrasada en 90° respecto de la intensidad; en cambio, en V_L el argumento está aumentado en 90°, porque la caída precede en 90° a la intensidad. En V_R, el argumento es ωt, porque la resistencia no produce ningún desfasaje.





La f.e.m. máxima E_0 se obtiene como resultante de los vectores que representan la caída de potencial óhmica, la caída inductiva y la caída capacitativa. El ángulo que forma E_0 con I_0 es el defasaje.

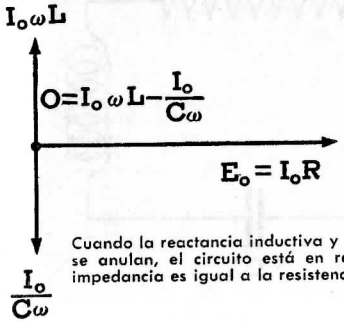
La suma de estas caídas parciales es igual a la f. e. m. del generador:

$$e = I_0 R \operatorname{sen} \omega t + I_0 \omega L \operatorname{sen} (\omega t + 90^\circ) + \frac{I_0}{C\,\omega} \operatorname{sen} (\omega t - 90^\circ)$$

Como se ve, esta expresión no es sencilla, pero se puede calcular la f. e. m. instantánea componiendo los vectores representativos de cada una de las caídas parciales y proyectando la resultante (que es la f. e. m. máxima) sobre el eje horizontal.

Observemos que la resultante de los vectores está dada por:

$$E_0 = \sqrt{(I_0 R)^2 + \left(I_0 \omega L - \frac{I_0}{C\,\omega}\right)^2}$$



Cuando la reactancia inductiva y la capacitativa se anulan, el circuito está en resonancia y la impedancia es igual a la resistencia óhmica.

Sacando factor común I_o^2 y luego sacado éste fuera de la raíz se puede escribir así:

$$E_o = I_o \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

donde resulta evidente que la raíz cuadrada funciona como una resistencia total. Se la llama *impedancia* del circuito y se la representa con la letra Z:

$$E_o = I Z$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

CIRCUITO EN RESONANCIA. Se puede variar la self o la capacidad, o bien ambas simultáneamente, para lograr que

$$\omega L = \frac{1}{C\omega} \quad \therefore \quad Z = \sqrt{R^2 + O} = R$$

con lo cual la única resistencia que encuentra la corriente es la óhmica, de modo que en ese caso la impedancia es igual a la resistencia óhmica. La impedancia es *mínima* y la intensidad es máxima y en fase con la caída óhmica $-V_L$ y V_C pueden ser varias veces mayor que la tensión aplicada–. En esas condiciones, se dice que el circuito está en resonancia.

Si llamamos f a la *frecuencia de resonancia* o *frecuencia propia* (ver pág. 445), como $\omega = \pi f$, resulta

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Esta fórmula es muy importante, y volveremos sobre ella al tratar los elementos de radiotelefonía.

EJEMPLO: *Una inductancia de 0,2 Hy está conectada en serie con un condensador variable. ¿Cuál deberá ser la capacidad de éste para que el circuito esté en resonancia, si la frecuencia es de 100 ciclos por segundo?*

$$\omega L = \frac{1}{C\omega}; \quad C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

$$\omega = 2\pi f \cdot \omega^2 = 4\pi^2 f^2 \cong 4 \cdot 9{,}86 \cdot 10\,000 \frac{1}{s^2} \cong 394\,400 \frac{1}{s^2}$$

$$C \cong \frac{1}{394\,400 \frac{1}{s^2} \cdot 0{,}24} = 0 \cdot 000\,012\ \text{F} = 12\ \mu\text{F}$$

EJEMPLO: *Una bobina de inductancia $L = 0{,}7$ Hy, un condensador de 10 μF y una resistencia de 100 Ω están en serie. Se aplica una f. e. m. eficaz de 115 V a 60 ciclos por segundo. Hallar:* a) *la reactancia inductiva,* X_L; b) *la reactancia capacitativa,* X_C; c) *la reactancia total,* $X_L - X_C$; d) *la impedancia,* Z; e) *la intensidad eficaz,* I.

$$a)\ X_L = \omega L = 2\pi f L \cong 6{,}28 \cdot 60\,\frac{1}{s} \cdot 0{,}7\ \text{Hy} \cong 264\ \Omega$$

$$b)\ X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{10\ \mu\text{F} \cdot 6{,}28 \cdot 60\,\frac{1}{s}} = \frac{1}{10^{-5}\ \text{F} \cdot 37{,}68\,\frac{1}{s}} \cong 266\ \Omega$$

$$c)\ X_L - K_C = -2\ \Omega$$

$$d)\ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(100\ \Omega)^2 + (-2\ \Omega)^2} \cong 100\ \Omega$$

$$e)\ I = \frac{E}{Z} = \frac{115\ \text{V}}{100\ \Omega} = 1{,}45\ \text{A}$$

Rectificación de corriente alterna

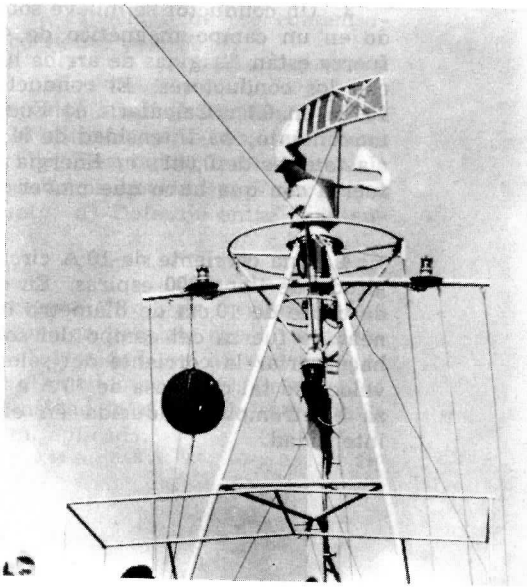
La gran mayoría de las usinas suministran CA, pero para muchos usos se necesita CC; así, por ejemplo, no puede utilizarse CA para cargar acumuladores, ni para galvanoplastia, ni para electrólisis, etc. En tales casos la corriente alterna se cambia por continua, lo que se efectúa mediante los *rectificadores.*

Hay muchos dispositivos que rectifican la CA. Los más comunes son: *a)* El *grupo motor-dínamo.* Es muy sencillo: consiste en un motor de CA que mueve una dínamo de CC. Generalmente, los dos se montan sobre el mismo eje. Una combinación semejante puede emplearse también para convertir CC en CA. En tal caso, el motor debe ser de CC.

b) Los rectificadores de óxido de cobre. Hemos visto el principio en que se basan estos aparatos: si un disco de cobre tiene una sola de sus caras recubiertas con una delgada capa de óxido de cobre, cuando la corriente quiere pasar del óxido de cobre al cobre, encuentra una resistencia mucho mayor que para pasar del cobre al óxido de cobre. Por lo tanto, en la circulación de una CA solamente pasará *media onda.* En tal caso no se obtiene CC, sino una corriente *pulsante.* Si se quiere obtener una rectificación de onda completa, hay que utilizar dos o más rectificadores; en realidad, en la práctica se emplean cuatro rectificadores simultáneamente, dispuestos en un solo grupo.

c) Los rectificadores electrónicos. De éstos nos ocupamos en el capítulo 28.

d) Los rectificadores de cristal. Existen algunas sustancias, como el sulfuro de plomo o galena, que tienen la propiedad de dejar pasar



Equipo de radar en el puente de un barco: uno de los modernos inventos que han sido posibles por el descubrimiento del efecto Faraday.

la corriente en un sentido y no dejarla pasar en sentido contrario. Por lo tanto, pueden emplearse para rectificar la corriente alterna. Como se sabe, la galena fue empleada en los primeros tiempos de la radiotelefonía, pero luego fue desplazada por las válvulas electrónicas. Sin embargo, en la actualidad vuelven a emplearse rectificadores del tipo de la galena –como el germanio, por ejemplo– especialmente en todos aquellos dispositivos que, como el radar, trabajan con frecuencias muy elevadas.

Problemas

1. Una bobina de 100 espiras de 2 cm² de sección cada una, está colocada normalmente a un campo de 60 Oe. Calcular: *a)* Flujo concatenado por cada espira; *b)* Flujo concatenado por la bobina; *c)* Ídem, cuando el solenoide tiene un núcleo de permeabilidad 10.

R.: 120 Mx; 120 Mx; 1 200 Mx

2. Un solenoide largo de 10 esp. cm está arrollado sobre un núcleo de hierro de 5 cm² de sección normal y permeabilidad 2 000. Por el solenoide circula una intensidad de 1 A. ¿Qué fuerza electromotriz inducida se produce en el solenoide si el núcleo de hierro se quita en 0,01"? (El solenoide mide 200 cm).

R.: 2 512 V

3. Un conductor se mueve sobre dos rieles horizontales y está situado en un campo magnético de 400 Oe de intensidad, cuyas líneas de fuerza están dirigidas de arriba hacia abajo, formando un ángulo de 30° con los conductores. El conductor mide 10 cm de longitud y recorre 20 cm en 0,1". Calcular: *a)* Fuerza electromotriz inducida durante el movimiento; *b)* Intensidad de la corriente, suponiendo que la resistencia total es de 0,001; *c)* Energía eléctrica desarrollada; *d)* Valor de la fuerza con que hubo que mover el conductor.

R.: 0,004 V; 4 A; 0,001 6 V; 800 dyn

4. Una corriente de 10 A circula por un solenoide de 50 cm de longitud que tiene 200 espiras. En el interior del solenoide hay un anillo de cobre de 10 cm de diámetro interior, situado normalmente a las líneas de fuerza del campo del solenoide. Por medio de un reóstato se hace variar la corriente del solenoide de una manera continua, a una velocidad tal que pasa de 10 A a 15 A en 20 segundos. Calcular la fuerza electromotriz inducida en el anillo durante esa variación de la intensidad.

R.: 0,000 000 987 V

5. La bobina de un electroimán mide 20 cm de longitud y tiene 120 espiras bobinadas sobre un núcleo de 5 cm de diámetro. La corriente de excitación vale 16 A. Sobre el núcleo de bobina otro solenoide de 20 espiras. Calcular la fuerza electromotriz que se induce en este segundo solenoide cuando en el primero la corriente de 16 A se anula en 1/20 segundo, y en las siguientes condiciones: *a)* Cuando la permeabilidad del núcleo vale 1; *b)* cuando esa permeabilidad vale 200.

R.: 0,000 974 V; 1,89 V

6. Calcular el coeficiente de autoinducción de una bobina de 100 vueltas, sabiendo que una corriente de 2 A eleva en 5 000 Mx el flujo a través de la bobina.

R.: 0,002 5 Hy

7. Una espira de 2 cm^2 de sección gira en un campo de 50 Oe a razón de 20 vueltas por segundo. Calcular la f. e. m. máxima inducida en la espira que tiene un núcleo de permeabilidad 20.

R.: 0,0025 V

8. Calcular la f. e. m. inducida en la espira del ejercicio anterior en el instante *t*: 0,005".

R.: 0,0015 V

9. Sobre una resistencia de 200 Ω actúan una f. e. m. alterna cuyo valor máximo es 200 V y su frecuencia 50 ciclos/s. Calcular: *a)* Intensidad máxima de la corriente; *b)* Intensidad eficaz; *c)* Potencia máxima; *d)* Potencia eficaz; *e)* Cantidad de calor desarrollado en 10".

R.: 1 A; 0,707 A; 200 A; 100 W; 240 Cal

10. Calcular la reactancia capacitativa de un condensador sabiendo que si sobre él actúa una f. e. m. de 200 V de valor eficaz y la intensidad que lo recorre vale 1 A. Calcular la capacidad de ese condensador, sabiendo que la frecuencia de la corriente vale 50 c/s.

R.: 200 Ω; $159 \cdot 10^{-12}$ F

11. Una f. e. m. alterna de 120 V de valor eficaz y frecuencia 60 c/s está aplicada sobre una resistencia de 10 ohms en serie con una bobina de 0,01 Hy de autoinducción. Calcular: *a)* Reactancia inductiva de la bobina; *b)* Impedancia del conjunto resistencia-bobina; *c)* Valor eficaz de la intensidad que atraviesa el conjunto; *d)* Defasaje entre la intensidad y la f. e. m.

R.: 3,8 Ω; 10,8 Ω; 11,1 A; 21°

12. Una f. e. m. de 220 V de valor eficaz y 50 c/s de frecuencia está aplicada sobre una resistencia de 500 ohms en paralelo con un condensador de 4 microfaradios. Calcular: *a)* Intensidad que atraviesa la resistencia; *b)* Intensidad que atraviesa el condensador; *c)* Defasaje de cada una de esas intensidades; *d)* Intensidad total; *e)* Defasaje de la intensidad total con respecto a la f. e. m. aplicada.

R.: 0,44 A; 0,18 A; 0°; 90°; 0,62 A; 31°

26 EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

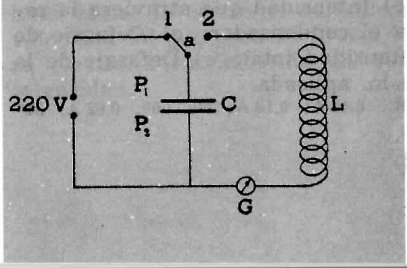
Producción y propagación del campo electromagnético

Funcionamiento de un circuito oscilante

Como ya se dijo*, para producir un campo electromagnético se necesitan campos eléctrico y magnético *variables*. La forma más simple de obtenerlos es mediante un circuito *oscilante*, como el que estudiamos en el capítulo anterior (circuito con R, L, C).

* Véase capítulo 23.

La descarga del condensador a través de la bobina se realiza en forma oscilante



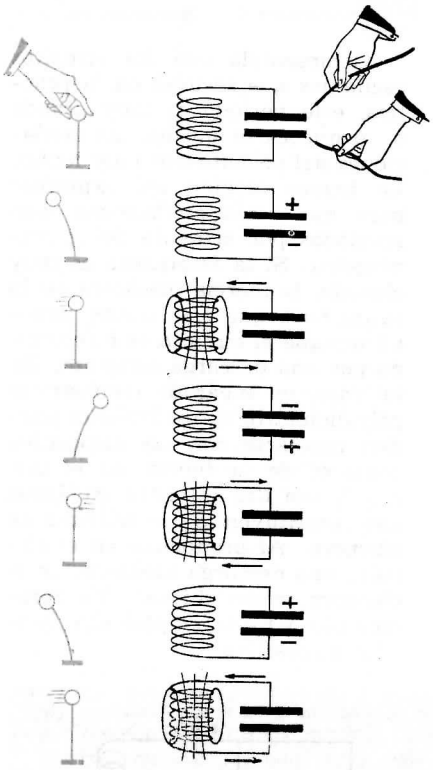
Para comprender por qué se los llama *oscilantes* y qué es lo que *oscila* en ellos, estudiemos un caso concreto: en el circuito que ilustra la figura, C es un condensador de 50 μF y L una bobina de 2 000 H*y*; la llave *a* permite conectar el condensador con la línea (220 V) en la posición *1*, o con la bobina, en la posición *2*. El galvanómetro *G* permitirá saber cuál es el sentido de la corriente cuando, colocando la llave en la posición *2*, descarguemos el condensador a través de la bobina *L*.

Comenzamos la experiencia cargando el condensador (llave en posición *1*). Luego pasamos la llave a la posición *2*: el condensador se descarga y la aguja del galvanómetro se desvía hacia un lado; pero aproximadamente *2* segundos después –y manteniendo siempre la llave en posición *2*– la aguja del galvanómetro se desvía hacia el lado contrario, indicando que la corriente de descarga del galvanómetro se ha invertido; 2 segundos más tarde la aguja del galvanómetro se volverá a invertir, y así sucesivamente, hasta que la corriente deje de circular. Esto indica que la corriente de descarga

del condensador es *oscilante*, es decir que cambia de sentido cada 2 segundos. ¿Por qué? Supongamos que al cargar el condensador su placa P_1 esté cargada positivamente. Al conectar la llave en posición 2, fluye una corriente de P_1 hacia P_2, a través de la bobina. Pero resulta que esa corriente no cesa al igualarse los potenciales de las placas, pues es mantenida por la autoinducción L de la bobina que, al oponerse a la circulación de la corriente (por la regla de Lenz) origina una fuerza electromotriz inducida que hace que el potencial de P_2 vaya sobrepasando cada vez más al de P_1; al anularse la corriente de P_1 hacia P_2, como las placas siguen conectadas, comienza una corriente de P_2 a P_1 (P_2 está a mayor potencial que P_1), y así se repetirá el proceso. Pero la intensidad de corriente irá disminuyendo paulatinamente por cuanto va disipando energía (por efecto Joule) en forma de calor en la resistencia óhmica del circuito.

Como indica la figura, se puede comparar la descarga oscilante de este circuito con las oscilaciones de una varilla elástica con una masa en su extremo libre. La inercia de ésta desempeña una función análoga a la de la autoinducción de la bobina y la elasticidad de la varilla a la función del condensador. Las oscilaciones de la varilla van disminuyendo de amplitud porque se disipa energía (en forma de calor) por frotamiento con el aire.

El hecho de que la aguja del galvanómetro cambie de sentido aproximadamente cada 2 segundos indica que el *período de la oscilación* de este circuito es de 2 segundos. En el capítulo anterior llamamos *frecuencia propia* o *frecuencia de resonancia* de un circuito con R, L, C a



Analogía entre las oscilaciones de una varilla elástica con una masa en el extremo y la descarga de un circuito oscilante.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Como la frecuencia es la inversa del período T, resulta

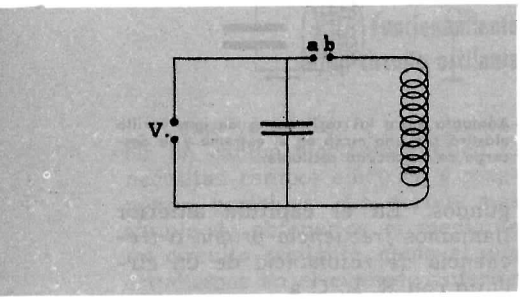
$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{LC}$$

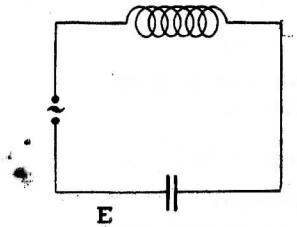
En nuestro ejemplo:

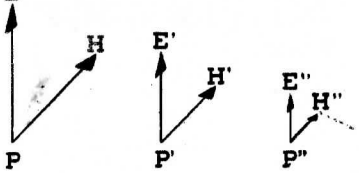
$$T = 2\pi\sqrt{2\,000\ \text{Hy} \cdot 50\ \mu\text{F}}$$

$$T = 2$$

Comparando con los circuitos oscilantes que se usan en la práctica, este período es muy grande o, lo que es lo mismo, las oscilaciones del circuito son muy lentas. Lo hemos elegido así exprofeso para que estas oscilaciones sean reveladas por la aguja del galvanómetro. Si la frecuencia es muy elevada, la inercia mecánica de la aguja hace que ésta quede inmóvil aunque el circuito esté recorrido por una descarga oscilante. En tal caso, en lugar de emplear un galvanómetro, las oscilaciones pueden revelarse con un dispositivo como el de la figura, en el que *a* y *b* son dos esferitas metálicas que constituyen lo que se llama un *chispero*. Al producirse en el circuito una descarga oscilante, en el chispero saltan chispas. Ya veremos cómo Hertz empleó este sencillo dispositivo.







Propagación de una onda electromagnética.

Propagación del campo electromagnético

Supongamos un circuito oscilante en funcionamiento: ¿qué ocurre en un punto P cualquiera del espacio, en las inmediaciones del circuito? Los campos eléctrico y magnético creados en el circuito por la descarga oscilante son *variables* (justamente porque la descarga es oscilante). Entonces los campos eléctrico y magnético creados en P son *variables* y estas variaciones generan en otros puntos P_1, P_2, P_3, etc., nuevos campos eléctricos y magnéticos variables. Como sabemos, llamamos *campo electromagnético* al conjunto de los dos; la energía producida en el circuito es transportada a través del espacio por el campo electromagnético.

Detección del campo electromagnético

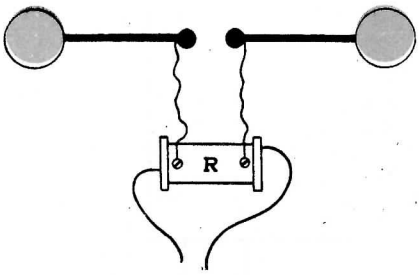
¿Cómo podemos saber que el razonamiento anterior es correcto? Habrá que encontrar un método para *detectar* el campo electromagnético producido en P por el circuito oscilante. ¡Pero esto es muy simple! Si el circuito oscila con frecuencia *f* entonces en P las variaciones de los campos también se producen con frecuencia *f*. Si colocamos en P otro circuito oscilante –pero cuyo condensador *no* ha sido cargado por ninguna fuente de potencia– y ajustamos su frecuencia propia –modificando convenientemente sus correspondientes L y C– si en P hay va-

riaciones de los campos; éstas actuarán sobre las cargas de los conductores de este segundo circuito oscilante y en él se producirán *oscilaciones*. ¡Y así ocurre! El primer circuito oscilante se llama *transmisor* (es el que *irradia* el campo electromagnético); el segundo es el *receptor* (es el que detecta o recibe el campo electromagnético irradiado por el primero). Y esto no es otra cosa que la idea *básica* de la radiotelefonía: la estación transmisora no es más que un circuito oscilante de gran potencia; nuestro aparato receptor es un circuito oscilante cuya capacidad C se modifica moviendo el dial de sintonía. Cuando, por ejemplo, colocamos nuestro dial en la estación LRA, Radio Nacional, que transmite (oscila) con una frecuencia de 870 Kc/s, la capacidad C del circuito oscilante de nuestro receptor toma el valor necesario para que éste entre en *resonancia* con el circuito oscilante de LRA y de esa manera nuestro propio circuito receptor oscilará a razón de 870 Kc/s y habremos así *sintonizado* LRA.

Las experiencias de Hertz

El físico alemán H. Hertz fue el primero que logró detectar el campo electromagnético. Veamos los elementos que empleó:

Circuito transmisor de Hertz: "Consiste –así lo describió él mismo– en un grueso alambre rectilíneo de cobre de 3 m de longitud, en cuyos extremos hay dos esferas de 30 cm de diámetro. El alambre está interrumpido en su parte media por un espacio de chispa de $\frac{3}{4}$ cm con dos esferitas de latón." El circuito funcionaba alimentado con una bobina de Ruhmkorff, que al ser conectada hacia saltar chispas entre las esferitas de latón.



El circuito oscilante rectilíneo de Hertz.

Circuito receptor de Hertz: Es simplemente un circuito cuadrangular de 75 cm de lado, constituido por un grueso alambre de cobre provisto de un pequeño espacio de chispa. En este espacio saltaron chispas cuando ubicó el receptor a 2 m del transmisor. Dijo entonces textualmente: "En verdad, creo haber comprobado el fenómeno de resonancia".

Habiendo demostrado así la existencia del campo electromagnético, Hertz realizó luego un sinnúmero de experiencias con las que demostró:

a) que el campo electromagnético se propaga por ondas;

b) que estas ondas se reflejan y refractan;

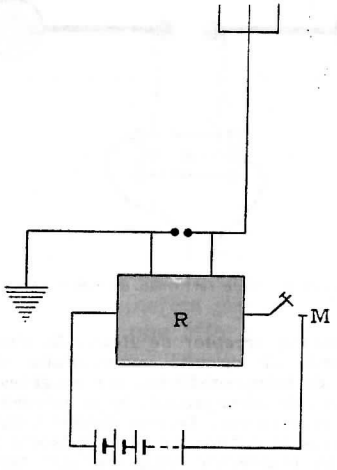
c) que estas ondas pueden interferir;

d) que estas ondas se polarizan, con lo que probó que eran transversales.

Hertz comprobó así que todas las predicciones de Maxwell eran correctas.

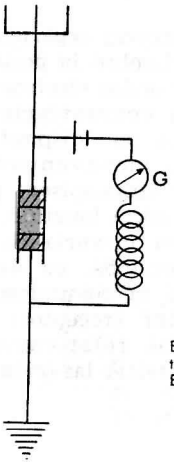
Telegrafía sin hilos

Desde las primeras experiencias de Hertz se vislumbró la posibilidad de emplear ondas electromagnéticas para la comunicación a distancia. Pero sus dispositivos presentaban dos inconvenientes: *a)* Su oscilador (transmisor) producía ondas de corta longitud, para las cuales la mayoría de los cuerpos son opacos, es decir, obstáculos para la comunicación; *b)* su resonador (receptor) necesitaba energías relativamente grandes para detectar las ondas.



Circuito transmisor de Marconi.

Guillermo Marconi, ingeniero italiano, en 1896 logró superar el primer inconveniente con un circuito transmisor semejante al de Hertz, aunque con dos modificaciones: *a)* reemplazó una de las esferas por la Tierra, y *b)* conectó la otra esfera a un largo alambre (antena). Así obtuvo ondas de mayor longitud, y mayor cantidad de energía irradiada por el transmisor. Con un manipulador Morse, M, enviaba señales de la duración que deseaba.



Esquema de receptor con cohesor de Branly.

El segundo inconveniente fue salvado por E. Branly, al inventar su *cohesor* (C), pequeño tubo de vidrio con dos electrodos, entre los cuales hay limaduras metálicas. Si se hace pasar una corriente continua a través del cohesor, o una alternada de baja frecuencia, su resistencia es muy elevada; en cambio, disminuye enormemente cuando el circuito es recorrido por una corriente de frecuencia elevada. El cohesor de Branly, conectado como indica la figura, es más sensible que el resonador de Hertz, y necesita menos cantidad de energía para captar las ondas.

En 1899 Marconi logró comunicación inalámbrica a través del canal de la Mancha (50 km).

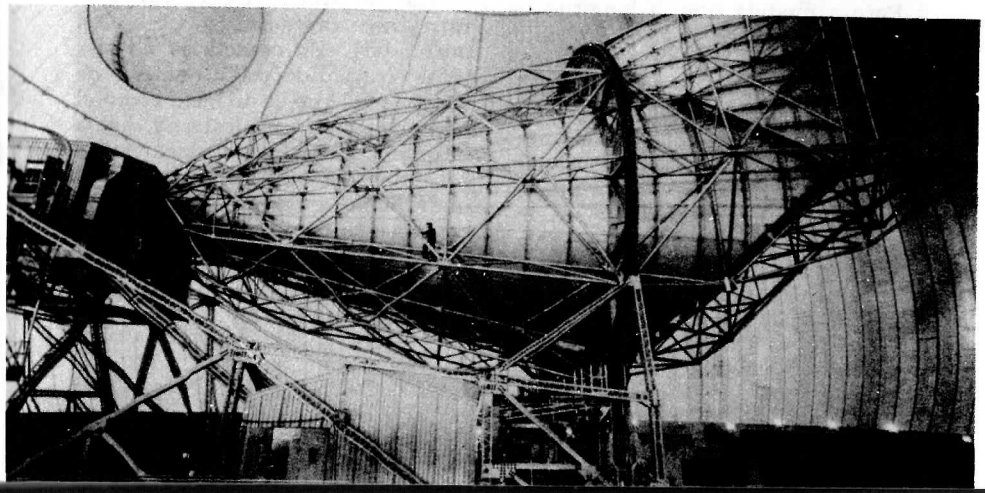
El espectro electromagnético

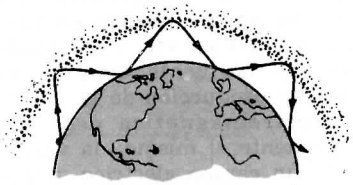
La asombrosa predicción de Maxwell, confirmada primeramente por Hertz y luego por muchos otros experimentadores, de que el campo electromagnético se propaga por medio de ondas transversales que viajan a la velocidad de la luz, llevó no sólo a considerar que la luz es un fenómeno electromagnético sino que podrían existir muchas otras formas, invisibles para el ojo humano pero detectables por otros medios, de estas ondas electromagnéticas. Las investigaciones de los últimos 80 años han demostrado que ello es cierto y que existe una familia completa de ondas electromagnéticas. Y así

como los colores de la luz visible se diferencian entre sí nada más que en la longitud de onda y se los dispone en el *espectro luminoso* que va del violeta al rojo, las radiaciones electromagnéticas integran el *espectro electromagnético* que se extiende desde las ondas de radio a los rayos γ. La naturaleza física de la radiación es la misma a lo largo de todo el espectro: las ondas tienen todas la misma velocidad, la misma naturaleza electromagnética y la única diferencia entre ellas es la frecuencia, y por lo tanto, la longitud de onda. Y así como los colores del espectro luminoso tienen distintos nombres, los "colores" del espectro electromagnético tienen nombres diferentes, generalmente originados en razones históricas pero que también tienen que ver con las fuentes que las producen. Así, las ondas de radio son emitidas por circuitos oscilantes de radio; las microondas son ondas de radio *muy cortas* (son cortas con respecto a las de radio, pero *largas* en comparación con las de la luz visible); los rayos infrarrojos son emitidos por objetos calientes; los rayos luminosos son producidos por los núcleos de átomos radiactivos, etc. Pero cualquiera sea la fuente emisora, el proceso de producción de la radiación electromagnética debe ser esencialmente el mismo: la variación de un campo eléctrico, generado por una carga oscilante, o por una carga que es acelerada o frenada bruscamente, o que es puesta en vibración, esa variación dará origen a un campo magnético variable. Así, por ejemplo, la radiación infrarroja es emitida por los choques de las moléculas de un sólido o un gas caliente. Tales choques hacen vibrar las cargas eléctricas que poseen esas moléculas y dichas vibraciones producen radiación electromagnética. En el caso de los rayos X, éstos se producen por efectos del choque de electrones de alta velocidad contra una placa metálica; el brusco frenado de esos electrones produce la radiación electromagnética que llamamos rayos X, etc.

El espacio está, pues, lleno de ondas electromagnéticas y es una verdadera suerte que nuestro ojo

Antena cornal, de la forma de una trompeta alpina, construida en Maine (Estados Unidos de América) para ser dirigida hacia el satélite de telecomunicaciones "Telstar". Esta antena puede transmitir y recibir programas de televisión, conversaciones telefónicas y mensajes telegráficos.





Propagación de ondas electromagnéticas con reflexiones en la ionosfera.

detecte solamente las ondas correspondientes a la luz visible, porque de lo contrario enloqueceríamos. Así como nuestro sistema visual es el "circuito detector" de la luz visible, para las otras porciones del espectro existen otros métodos de detección. Así, el infrarrojo es detectado por placas fotográficas especiales; las ondas de radio por circuitos oscilantes adecuados; las microondas por las antenas de radar, etc.

Todas las ondas se propagan de la misma manera, pero a causa de su diferente longitud de onda aparecen diferencias prácticas interesantes. Así las ondas largas (como las de radio) no tienen inconvenientes en "rodear", por difracción, cualquier objeto normal interpuesto en su trayectoria. Pero a medida que la longitud de onda disminuye, esa "habilidad" para difractar disminuye también y la propagación se hace en línea recta, como la de la luz.

Las ondas emitidas por la antena de un estación transmisora son esféricas, y parece evidente que no podrán ser captadas desde un lugar de la Tierra que, por la curvatura de la misma, quede muy por debajo del plano tangente a la Tierra en la estación transmisora. Pero cuando comenzó a difundirse la radiotelegrafía se ensayaron transmisiones en distintas longitudes de onda, y se encontró que las ondas de entre 10 y 50 m de longitud (las que en radio se llaman ondas cortas) tienen un alcance mucho mayor que las de 200 a 600 m (ondas largas) empleadas por las transmisoras comerciales.

Este mayor alcance de las ondas se debe a que en la atmósfera hay una capa llamada ionosfera, situada a unos 100 km de altura, que actúa como un espejo, pero solamente para las ondas cortas, mientras que es transparente para las largas, y también para ondas muy cortas, como las de la televisión. Por eso ésta tiene un alcance de solamente unos 150 km, a no ser que se recurra a estaciones retransmisoras.

Hay incontables aplicaciones de los diversos integrantes de la "familia electromagnética". Radio, televisión, telefonía sin hilos, etc., son ejemplos bien conocidos, para no hablar de la luz visible. Las microondas comprenden la porción del espectro cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 30 cm y 1 cm y una de sus aplicaciones más difundidas es el *radar* (siglas de Radio Detection and Ranging; captación y ubicación por radio). En esencia es un sistema constituido por un emisor de microondas que se dirigen, como el haz de luz de una linterna, hacia el objeto que se desea ubicar, y un receptor que recibe las mismas ondas una vez reflejadas. El receptor está provisto de un osciló-grafo de rayos catódicos*, similar

---

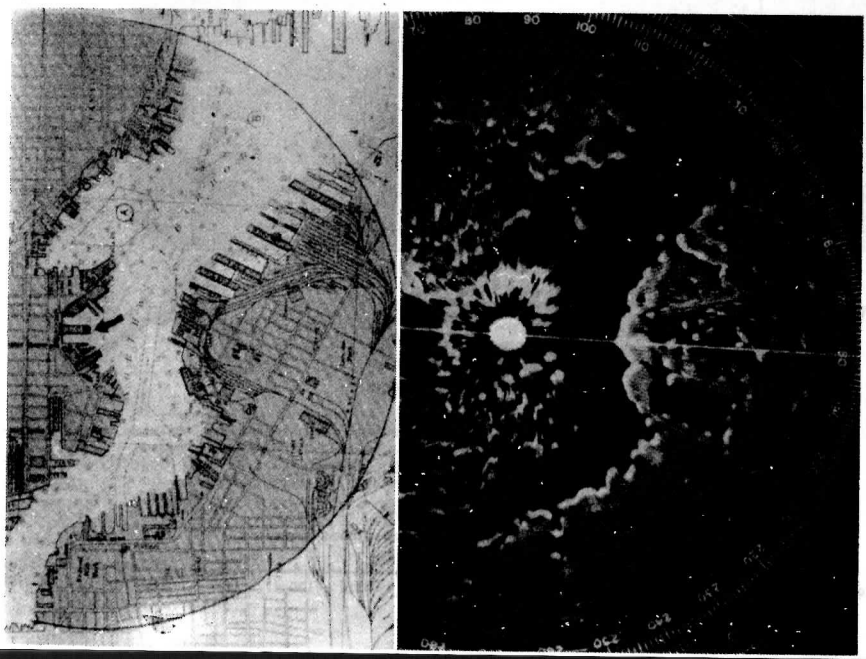
Véase capítulo 28.

al de un televisor, en cuya pantalla se hace visible el "eco" de las microondas. En 1946 se envió, por primera vez, un haz de microondas a la Luna y a los 2,4 segundos el radar percibió el "eco lunar". Las microondas se usan, además, como el más moderno sistema de telefonía, siendo capaces de transmitir simultáneamente varios centenares de conversaciones.

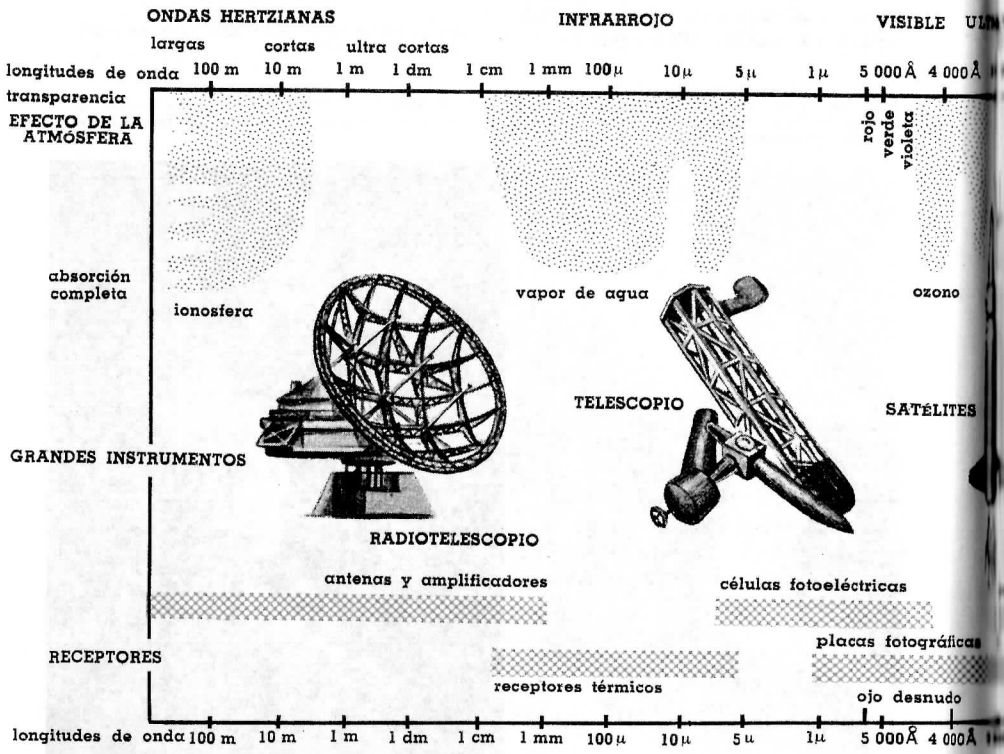
La radioastronomía constituye actualmente una de las más fascinantes aplicaciones del electromagnetismo. La idea es muy simple: explorar el cosmos por medio del análisis de las ondas de radio que emiten las estrellas. Porque si una estrella emite luz visible –que estudiamos mediante el telescopio y la espectroscopia óptica– no hay razón alguna para que no emita otras radiaciones, por ejemplo, ondas de radio. Esta posibilidad

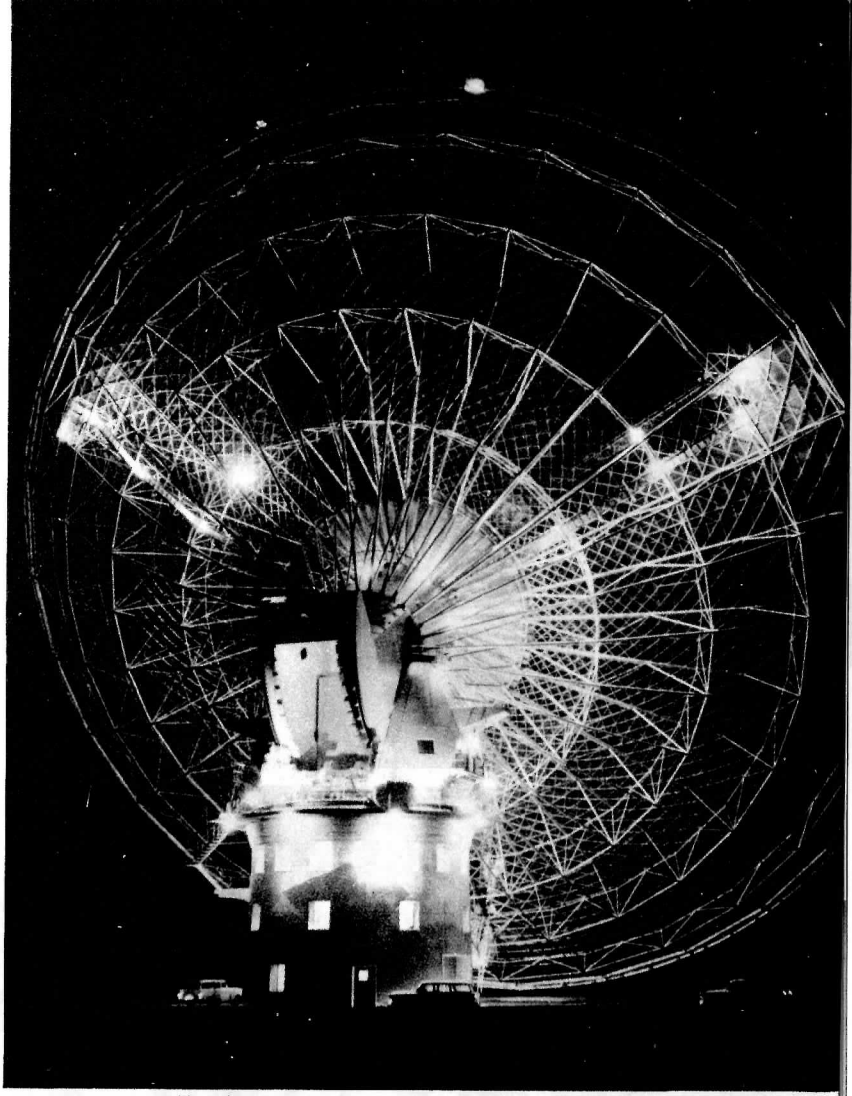
Una compleja antena empleada para transmitir conversaciones telefónicas.

A la izquierda, un mapa del fiordo de Oslo; a la derecha, la pantalla del radar en la que se percibe la zona marcada en el mapa con un círculo, y en la que se advierte la presencia de manchas provocadas por barcos en navegación.



ya fue aceptada en 1896, cuando se expresó que las ondas de radio pertenecen a la misma familia electromagnética que la luz visible. En 1930 se detectaron ondas de radio emitidas, no por el Sol, sino por la Vía Láctea. El radiotelescopio es el instrumento empleado para estos estudios y en esencia no es más que una antena de radar de tipo especial. Actualmente existen radiotelescopios en diversos países, incluyendo la Argentina, y con ellos no sólo se explora el espacio, sino que se reciben los mensajes de los satélites artificiales. El estudio más fantástico en radioastronomía se lleva a cabo en estos momentos en Estados Unidos de América: el proyecto consiste en tratar de saber si hay vida inteligente en planetas del sistema de la estrella más cercana a la Tierra después del Sol. Se piensa que si hubiera vida inteligente en ese punto del cosmos, ¡los habitantes del mismo podrían estar explorando el universo con ondas de radio! Entonces el radiotelescopio –que está permanentemente enfocado hacia él– recibiría dichas señales. A tal efecto, una gigantesca computadora electrónica analiza permanentemente todas las ondas que llegan al instrumento tratando de "descifrar" algún mensaje. ¡Si la computadora descubre la existencia de un "código", habrá que pensar que, efectivamente, en dicho lugar hay habitantes inteligentes!





El radiotelescopio de 70 m del Observatorio Radioastronómico Nacional Australiano, en Parkes, Nueva Gales del Sur, Australia.

OLETA

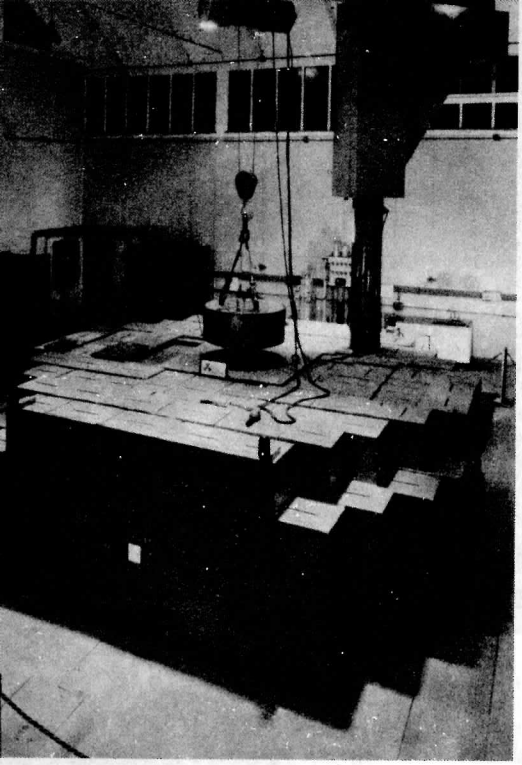
Å 2 000Å 1 000 Å

oxígeno y nitrógeno

talles **luminiscentes**

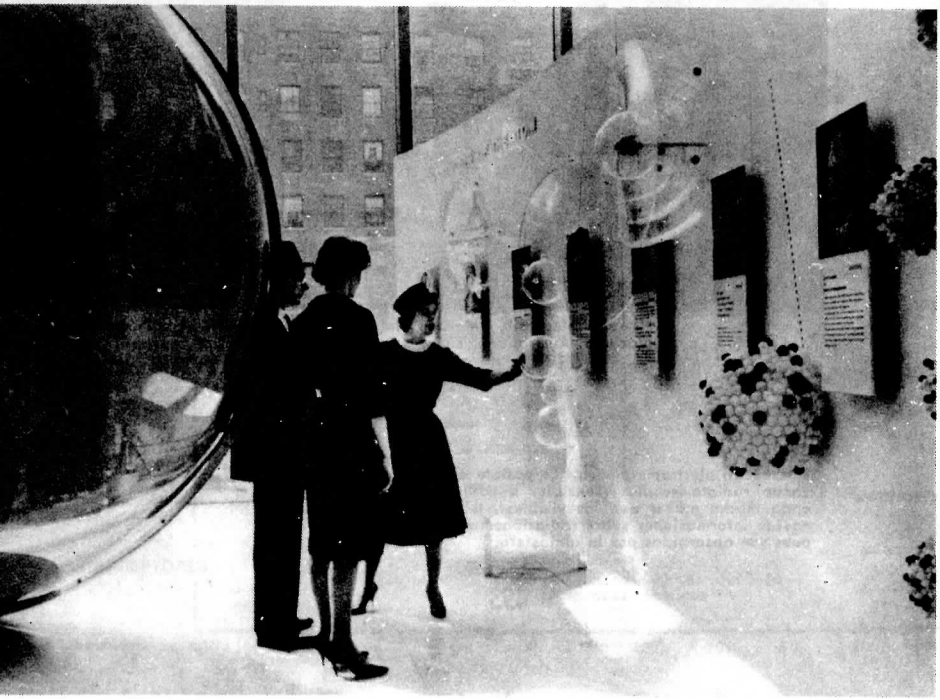
2 000Å 1 000Å

El espectro electromagnético. Es posible explorar el espacio utilizando radiotelescopios (sensibles a radiaciones de longitud de onda mucho mayor que las visibles), telescopios y satélites que envían informaciones sobre radiaciones que no llegan a la Tierra, pues son absorbidas por la atmósfera.



VII

EL MUNDO DEL ÁTOMO



"La doctrina electrónica es una ciencia que con todo rigor de justicia pertenece al siglo XX. *Antes del asombroso decenio comprendido entre 1895 y 1905, a fines de un siglo y comienzos de otro, decenio que abarca de Roentgen a Einstein, decenio que creó la concepción científica revolucionaria del siglo* XX, *nadie había soñado en abrir puertas, clasificar colores y contar objetos por medio del «ojo eléctrico»; en voces que dan la vuelta al mundo; en aviones enemigos localizados mediante tubos electrónicos; en películas cinematográficas «televisadas» a través del éter, ni en motores a los que se detiene o se hace funcionar a distancia. Ciertamente, cuando aquella noche del 29 de abril de 1897, J. J. Thomson, inglés de nacimiento y profesor de física en la Universidad de Cambridge, anunció el descubrimiento del electrón, al que denominó «corpúsculo de electricidad», sus colegas pensaron que se estaba mofando de ellos."*

(F. R. Moulton y J. J. Schifferes, en *Autobiografía de la Ciencia.*)

27 EL ELECTRÓN

En una conferencia pronunciada el 30 de abril de 1897 en la Royal Society, el físico inglés J. J. Thomson dio las primeras pruebas irrefutables de la existencia del electrón. Ya había marcados indicios de la existencia de una carga eléctrica elemental, sobre todo por las leyes de Faraday de la electrólisis, y Johnstone Stoney hasta le había dado el nombre de *electrón*, pero los trabajos de Thomson dejaron fuera de toda duda la cuestión.

Algunas características del electrón:

Carga eléctrica:

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$$

Masa:

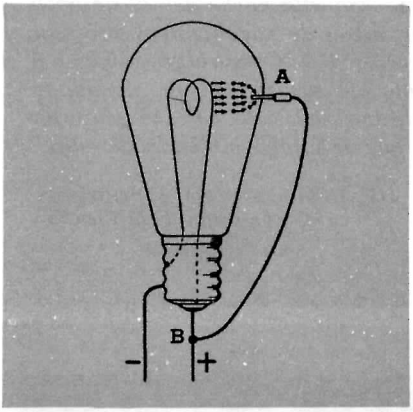
$$m = 0{,}9 \cdot 10^{-27}\ g$$

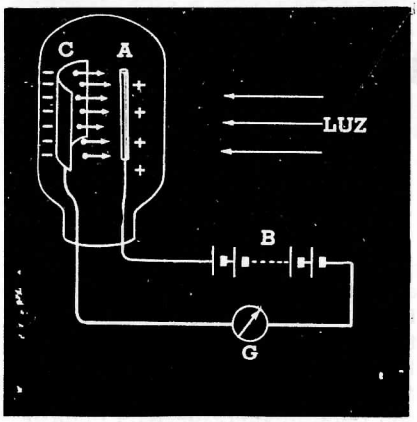
Carga específica:

$$e/m = 1{,}8 \cdot 10^{8}\ C/g$$

Cómo obtener electrones

a) Efecto termoiónico. En 1880 Elster y Geitel iniciaron una investigación sistemática sobre un fenómeno conocido desde unos 200 años atrás: *en las inmediaciones de un cuerpo caliente el aire se hace algo conductor de la electricidad.* En 1893 Édison observó que al encender una lámpara, por un alambre conectado como el AB de la figura, circula corriente a pesar de que el circuito está abierto. Por fin, J. J. Thomson demostró experimentalmente que de un cuerpo a alta temperatura se desprenden electrones que lo rodean como una nube. En el caso de la figura, en que el potencial de A es mayor que el del filamento, los electrones son atraídos por A, y al circular hacia B constituyen la corriente observada por Édison.





Esquema de célula fotoeléctrica.

Cabe preguntarse: ¿por qué escapan electrones de un cuerpo caliente? Consideremos, por ser más simple, un metal: además de sus átomos neutros, existen en él electrones libres y iones positivos. Todas esas partículas están en vibración y la velocidad con que lo hacen se manifiesta como temperatura del cuerpo. Calentarlo significa entregarle energía calorífica, que cada una de aquellas partículas absorbe en forma de energía cinética, con lo cual aumentan su velocidad. La energía entregada al cuerpo se reparte en partes iguales para cada una de sus partículas, y como los electrones tienen una masa mucho menor, sus velocidades reciben un incremento muy grande y se encuentran así posibilitados para escapar a la atracción de las cargas positivas.

b) Efecto fotoeléctrico. (Liberación por la luz.) H. Hertz estaba trabajando en 1887 en la producción de ondas electromagnéticas, cuando observó que la chispa entre

dos terminales saltaba mucho más fácilmente cuando se los iluminaba con luz ultravioleta. Comunicó su observación al mundo científico, y siguió trabajando con sus ondas. *Había descubierto el efecto fotoeléctrico, es decir, la liberación de electrones por medio de la luz.*

Pero la intervención de Hertz en este fenómeno no pasó de ahí, y es a Lenard a quien se debe un estudio experimental sistemático del efecto fotoeléctrico, que en definitiva condujo a la explicación científica del mismo.

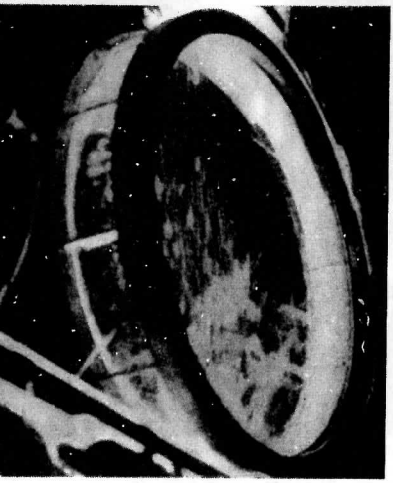
En el circuito de la figura, C y A son un cátodo y un ánodo metálicos, colocados dentro de una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío. La superficie de C cóncava hacia A, está recubierta de una capa de cesio, o potasio, o alguna otra sustancia adecuada. El galvanómetro G indica si pasa o no corriente. Cuando sobre C se hace incidir luz, G señala el pasaje de una corriente. ¿Cómo se ha cerrado el circuito? Con los electrones que la luz incidente arranca del cátodo, y que son atraídos por el ánodo; ellos cierran el circuito, y su flujo constituye la corriente revelada por G. El dispositivo descripto constituye una *célula fotoeléctrica.*

Lo que observó Hertz se debe a que la luz ultravioleta, al incidir sobre el terminal negativo que está a un potencial elevado ya próximo a provocar el estallido de la chispa, le arranca electrones que son atraídos por el terminal positivo y "abren caminos", digamos así, a los demás electrones, que se precipitan detrás de los primeros, constituyendo la chispa.

Cristales de calcita bombardeados por un acelerador cuyos rayos X golpean a los electrones fuera de sus órbitas. Al volver a caer éstos, la calcita emite luz visible, pero tan sólo unos pocos minutos. Con esa luz se ha tomado esta fotografía.

c) Emisión espontánea. Muchas sustancias radiactivas emiten electrones espontáneamente, en forma incontrolable por el hombre. Esos electrones constituyen los *rayos* β.

d) Rayos catódicos. (Emisión de cátodo frío.) Cuando en los extremos de un tubo en el que se ha hecho el vacío se establece una diferencia de potencial elevada, del cátodo se desprenden electrones que se precipitan sobre el ánodo. Estos electrones constituyen los *rayos catódicos.* El proceso es, en esencia, el mismo que el efecto termoiónico, con la diferencia que la energía necesaria para que los electrones superen la atracción de los iones positivos, la provee el campo eléctrico, y no la agitación térmica.



Cámara de Wilson.

Trazo de electrón en la cámara de Wilson.

Cómo "ver" electrones

Lo que describimos a continuación son maneras de visualizar la presencia de electrones y de seguir su trayectoria, mediante las perturbaciones que ellos producen a su paso.

a) Por fluorescencia. Los electrones tienen la propiedad de hacer luminosa una pantalla fluorescente en el punto donde incidan. Las imágenes de una pantalla de televisión son las señales de electrones en una pantalla fluorescente; donde incide mayor cantidad de electrones, más clara se pone la pantalla.

b) La cámara de Wilson. Del mismo modo que cuando el agua pasa del estado líquido al sólido el proceso se ve favorecido por la presencia de impurezas, alrededor de las cuales se forman las primeras partículas de hielo*, la condensación de vapor de agua se ve muy favorecida por la presencia, en el ambiente de vapor saturado, de partículas de polvo, y también de iones, los cuales sirven de *núcleos* o *gérmenes de condensación*, sobre los cuales se depositan rápidamente gotitas de agua.

Para visualizar la trayectoria de electrones, C. T. R. Wilson construyó un aparato que aprovecha esa propiedad de los iones. Consi-

* Véase Introducción a la Física, tomo I, pág. 393.

deremos un cilindro cerrado que contiene vapor de agua saturado. La base superior, constituida por un pistón, puede deslizarse a lo largo del cilindro. Si se aumenta bruscamente el volumen del cilindro deslizando el pistón hacia arriba, y el ambiente dentro del cilindro está libre de toda partícula que sirva de germen de condensación, es muy improbable que se observe la formación de gotitas de agua; pero si cerca de la cámara se tiene una fuente de electrones (por ejemplo una sustancia radiactiva), cada electrón que penetre en la cámara dejará señalada su trayectoria por una estela de gotitas. En efecto: cada electrón va chocando con los átomos que encuentra a su paso, y aquéllos que quedan ionizados son gérmenes de condensación. No se ven, pues, los electrones sino su "rastro". Es como cuando en la lejanía se reconoce la presencia de un automóvil por un camino de tierra por la polvareda que levanta, aunque la distancia impida verlo.

La cámara de Wilson, o cámara de niebla, es, sin duda alguna, uno de los inventos más sencillos, y a la vez uno de los instrumentos más preciosos que el físico tiene a su alcance.

c) Electrones fotográficos. Si un electrón se mueve por dentro de una emulsión fotográfica, las partículas de sal de plata alcanzadas en su camino quedan sensibilizadas, y al revelar la película los granitos de plata metálica muestran claramente el trayecto recorrido por el electrón. El método fotográfico es sumamente útil en el estudio de los rayos cósmicos. (Ver figura de la pág. 518.)

Cómo dirigir electrones

a) Aceleración en un campo eléctrico. Cuando un electrón está colocado en un campo eléctrico E, una fuerza constante, $e\,E$, lo impulsa hacia el ánodo. El campo eléctrico realiza así un trabajo

$$W = e\,V$$

donde e, es la carga del electrón y V la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo.

Ese trabajo se emplea en dotar al electrón de una energía (la que tiene cuando llega al ánodo) $\frac{1}{2} m\,v^2$, siendo v su velocidad de llegada. El trabajo realizado por el campo es igual a la energía adquirida por el electrón:

$$e\,V = \frac{1}{2} m\,v^2$$

Una nueva unidad de energía. La energía de las partículas subatómicas (electrones, protones, neutrones, etc.) se suele expresar en *electrón-volts*.

1 electrón-volt es la energía que adquiere un electrón cuando pasa a través de una diferencia de potencial de 1 volt.

Recordemos que

$$1\ J = 1\ C \cdot 1\ V$$

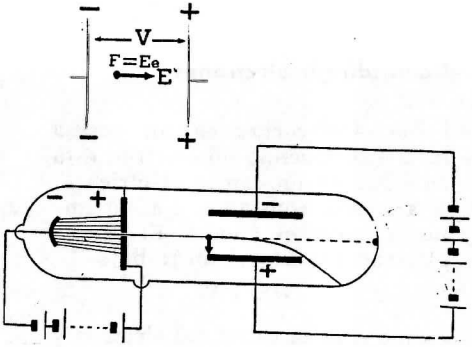
de modo que, como la carga de un electrón es $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, la equivalencia entre el joule y el electrón-volt es

$$1\ e\,V = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 1\ V = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J$$

También es frecuente el uso de un múltiplo, el *megaelectrón-volt*

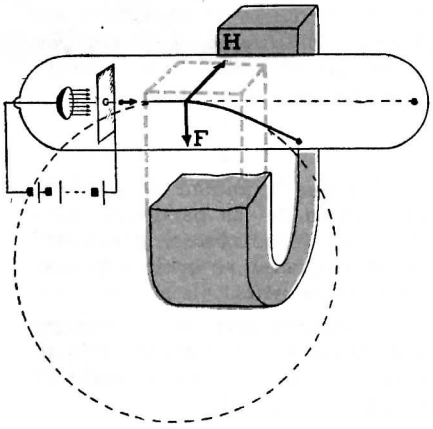
$$1\ M\,e\,V = 1\,000\,000\ e\,V = 1{,}6 \cdot 10^{-13}\ J$$

Campo eléctrico transversal. Si un electrón se mueve paralelamente al campo eléctrico, éste lo



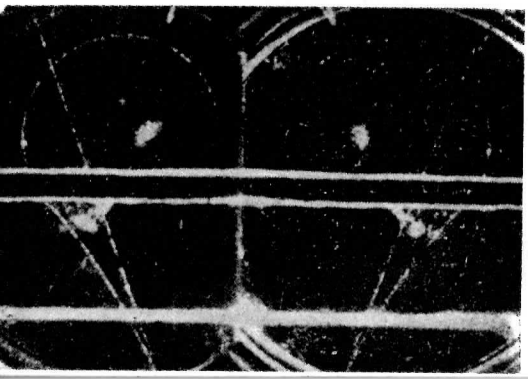
A la izquierda): Electrón en un campo eléctrico paralelo a su trayectoria. A la derecha): Un haz de electrones cruzando un campo eléctrico normal a su trayectoria. Cada electrón se comporta como una bala de fusil disparada horizontalmente; aquél es atraído por la placa positiva con una fuerza $F = Ee$, y la bala por la Tierra, con una fuerza $P = mg$. Ambos describen una parábola.

Un electrón que entra en un campo magnético H normal a su trayectoria es obligado a describir un arco de circunferencia, o, si el campo magnético es suficientemente intenso, circunferencias enteras con movimiento circular uniforme.



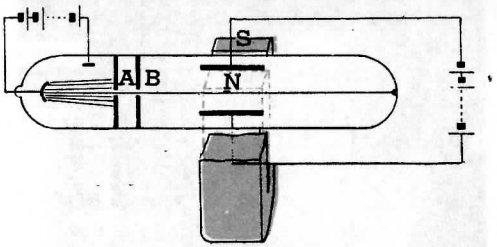
acelera sin desviarlo de su trayectoria. Pero si el campo es transversal, el electrón "cae" hacia el ánodo (como una piedra lanzada horizontalmente cae hacia tierra en el campo gravitatorio terrestre). En este caso, la trayectoria del electrón es una parábola.

b) *Campo magnético transversal.* El dispositivo de la figura muestra un haz de rayos catódicos pasando entre los polos de un imán. Cuando un conductor por el que circula corriente está colocado en un campo magnético normal a él, el conductor soporta una fuerza perpendicular, a la vez, al campo magnético y al conductor (Regla de la palma de la mano izquierda). Un electrón en movimiento es una corriente eléctrica, de modo que cada electrón que entre en el campo magnético sufrirá una desviación perpendicular al campo y a su trayectoria. Pero cuando ya se ha desviado de su trayectoria original, la fuerza cambia de dirección para seguir siendo normal a la trayectoria; y así, la fuerza es, en cada instante, perpendicular a la trayectoria. Ello trae como consecuencia que sólo cambie la dirección de la velocidad del electrón, pero no su medida, y éste describe así una circunferencia con movimiento circular uniforme, o un arco, si antes de completarla escapa al campo.



Esta cámara de Wilson está colocada en un campo magnético de 17 000 gauss. La curva de la parte superior corresponde a un electrón negativo, cuya energía se calculó en 90 MeV, que incide en una lámina de plomo. De ella expulsó un electrón positivo (obsérvese que las curvaturas tienen sentidos opuestos) cuya energía se calculó en 26 MeV.

Cómo identificar electrones



Esquema del aparato de Thomson para medir e/m.

La carga específica. Se llama carga específica del electrón a la razón entre su carga y su masa: e/m. Representa la carga eléctrica que tendría una unidad de masa de electrones (por ejemplo, 1 g de electrones).

J. J. Thomson ideó un método para medir la velocidad de un electrón y su carga específica.

En un tubo como el de la figura que ilustra la página, dos ranuras, A y B delimitan un delgado haz de electrones. En su camino deben atravesar una zona en la que actúan conjuntamente un campo eléctrico y otro magnético, perpendiculares entre sí y al haz. Se disponen los campos de modo que mientras el eléctrico, actuando solo, produce una desviación del haz hacia arriba, el magnético, actuando solo produce una desviación igual, pero hacia abajo. Así, cuando los campos actúan simultáneamente el haz no es desviado porque la fuerza eléctrica es compensada exactamente por la magnética. Ésta vale (no lo demostramos) $H\,e\,v$; aquélla, $E\,e$; de modo que:

$$\left.\begin{array}{l}\text{Fuerza eléctrica:}\quad E\,e\\ \text{Fuerza magnética:}\quad H\,e\,v\end{array}\right\} \therefore\ H\,e\,v = E\,e\ \therefore\ v = \frac{E}{H} \qquad (1)$$

Luego, se hace actuar solamente al campo magnético, y cada electrón se desvía describiendo un arco de circunferencia. La fuerza magnética hace las veces de fuerza centrípeta, de modo que es aplicable la fórmula*:

$$H\,e\,v = \frac{m\,v^2}{R}\ \therefore\ H\,e = \frac{m\,v}{R} \qquad (2)$$

De (1) y (2):

$$H\,e = \frac{m}{R}\cdot\frac{E}{H}\ \therefore\ \boxed{\frac{e}{m} = \frac{E}{H^2\,R}}$$

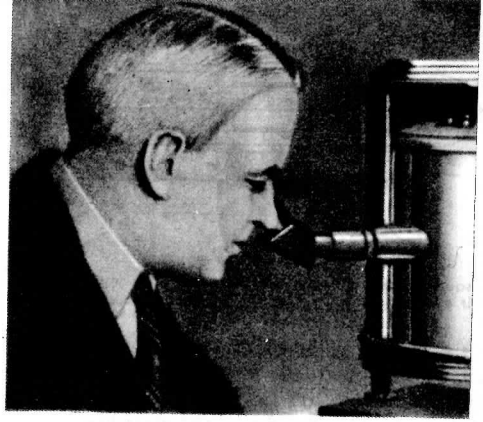
Midiendo E, H y R, Thomson calculó la carga específica del electrón, que, como lo señalamos al comienzo del capítulo, es

$$e/m = 1{,}8\cdot 10^8\ \frac{C}{g}$$

Lo que significa que 1 g de electrones tiene una carga de 180 000 000 C.

Cuando Thomson terminó su cálculo de e/m, se sorprendió del resultado: era "demasiado" grande. En esa época, 1897, se creía que

* Véase Introducción a la Física, tomo I, pág. 178.



Roberto Andrés Millikan.

la partícula más liviana era el átomo de hidrógeno, y la razón entre la carga y la masa del ion hidrógeno calculada mediante datos de la electrólisis era unas 1 000 veces menor que la del electrón. De ahí Thomson llegó a la conclusión de que había una partícula material unas 1 000 veces más liviana que el átomo de hidrógeno. En la conferencia dada en la Royal Society dijo: "En los rayos catódicos tenemos la materia en un nuevo estado; un estado en el cual la subdivisión de la materia es llevada mucho más allá de lo que es en el estado gaseoso ordinario; un estado en el cual toda materia (es decir, materia proveniente de diferentes orígenes, tales como hidrógeno, oxígeno, etc.), es de una sola y misma clase; siendo esta materia la sustancia de la cual están constituidos todos los elementos químicos".

Así nació el electrón.

La carga del electrón

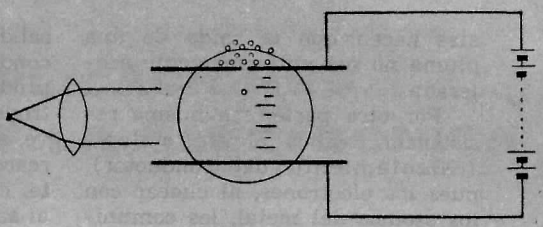
Roberto Millikan, físico americano, logró medir en 1909 la carga de un electrón aislado, en una serie de experiencias realizadas en la Universidad de Chicago.

Con un pulverizador como el que usan los peluqueros para mojar el cabello, Millikan introdujo una nube de gotitas de aceite entre las placas de un condensador colocado horizontalmente. Por el frotamiento al ser pulverizadas, las gotitas están eléctricamente cargadas. Si entre las placas del condensador no hay una diferencia de potencial, las gotitas caen hacia la placa inferior, por gravedad. Si se establece una diferencia de potencial, las gotitas serán atraídas por la placa de signo opuesto al suyo, y si esa placa es la superior, la gotita ve frenada su caída e, incluso, si la diferencia de potencial es lo suficientemente elevada, comienza a subir. Si antes de llegar a la placa superior se descarga el condensador, la gotita vuelve a bajar; se tiene así un medio de hacer subir y bajar la gotita, manteniéndola entre las placas todo el tiempo que se desee.

Como la gotita es muy pequeña, su movimiento a través de las moléculas de aire es uniforme, es decir, de velocidad constante; y las velocidades, al subir y al bajar, son directamente proporcionales a las fuerzas que en cada caso actúan sobre la gotita.

Cuando cae, con velocidad v_1, la fuerza que actúa es su propio peso P; cuando sube, con velocidad v_2, la fuerza es la del campo eléctrico, E q (siendo q la carga de la gota), menos su peso. La proporcionalidad antedicha es:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{P}{E\,q - P} \quad \therefore \quad q = \frac{P}{E} \cdot \frac{v_1 + v_2}{v_1}$$



Esquema de la experiencia de Millikan. La nube de gotitas se forma en la parte superior del condensador, y las gotas entran al campo por un agujerito de la placa superior. A la izquierda está representada una fuente luminosa con una lente para iluminar las gotitas; la circunferencia representa el campo de un anteojo con una escala para medir la velocidad de las gotas.

Todo el problema se reduce, pues, a medir el peso de la gotita, el campo eléctrico entre placas, y las velocidades de ascenso y descenso de gotitas.

De esta manera Millikan midió la carga eléctrica de millares de gotitas, y encontró que unas tenían poca carga eléctrica; otras, mucha; otras, valores intermedios. Pero las cantidades eran siempre:

$$q_1 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$$

o bien

$$q_2 = 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = q_1 \cdot 2\,,$$

o bien

$$q_3 = 4{,}8 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = q_1 \cdot 3\,,$$

o bien

$$q_4 = 6{,}4 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = q_1 \cdot 4\,,$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

o bien

$$q_n = \ldots\ldots\ldots = q_1 \cdot n$$

Jamás se encontró una carga eléctrica menor que $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, ni una carga mayor que no sea múltiplo de ella lo que evidencia la estructura granular de la electricidad y que el menor "granito" de electricidad, el electrón, tiene una carga de $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

El descubrimiento del electrón tiene una importancia mucho mayor que la de una simple curiosidad científica; permite explicar todos los fenómenos vinculados con la corriente eléctrica, tanto en los metales, como en los líquidos (electrólisis) y en los gases.

Hemos anticipado que en los metales se encuentran electrones libres, y que la corriente eléctrica que circula por un conductor cuando entre sus extremos se establece una diferencia de potencial, consiste en la traslación de los electrones libres.

El electrón también permite una interpretación sencilla de la resistencia eléctrica de un conductor: es la resistencia que ofrecen los átomos del metal al paso de los electrones. Podría argüirse, sobre la base de lo explicado anteriormente*, que como cada electrón está sometido a un campo eléctrico constante (provocado por la diferencia de potencial entre los extremos del conductor), el movimiento de cada electrón debería ser uniformemente acelerado, y por lo tanto, la intensidad de la corriente iría aumentando proporcionalmente con el tiempo. Pero la resistencia que encuentran los electrones para pasar entre los átomos del metal, hace que el movimiento se haga uniforme, del mismo modo que las moléculas de

* Véase pág. 459.

aire hacen que la caída de una pluma no sea uniformemente acelerada.

Por otra parte, esa misma resistencia explica el efecto Joule (calentamiento del conductor), pues los electrones, al chocar con los átomos del metal, les comunican energía: ese aumento de energía se manifiesta como aumento de temperatura.

En cuanto a la conducción electrolítica, remitimos al lector a lo dicho en otro lugar*.

En lo referente a la conducción eléctrica en los gases, la existencia del electrón explica con naturalidad, por ejemplo, en qué consiste una chispa, por qué es luminosa y por qué su trayectoria es sinuosa y no rectilínea. En efecto: cuando entre dos cuerpos cargados a distintos potenciales salta una chispa, lo que acontece es que el campo eléctrico establecido entre ambos comunica a los electrones la energía suficiente como para saltar del conductor al aire, dirigiéndose hacia el conductor de mayor potencial. Al hacerlo, cada electrón choca contra átomos de la atmósfera que rodea a los conductores, y su energía es suficiente para ionizarlos; los electrones arrancados a esos átomos se dirigen hacia el conductor de mayor potencial, y los iones positivos hacia el otro; estos iones positivos facilitan la salida de nuevos electrones del conductor y por consiguiente la producción de nuevos iones y electrones. En cierto modo, como se ve, es un proceso que recuerda una reacción en cadena. Por otra parte, como los choques se producen al azar, se comprende que los iones y electrones salten sin mantenerse sobre la recta que determinan los conductores, y de ahí que el camino seguido por la chispa sea sinuoso.

Además, no siempre el electrón que choca contra un átomo llega a ionizarlo, sea porque desde que salió su energía no era suficiente para tanto, sea porque ya perdió una parte en choques anteriores. En esos casos, el choque del electrón produce en el átomo un estado excitado, es decir, uno de sus electrones periféricos ha saltado desde su órbita a otra más alejada del núcleo. Ese electrón ha "almacenado", digamos así, la energía recibida en el choque, en forma de energía potencial. Pero el átomo vuelve rápidamente a su estado normal, y emite esa energía en forma de radiación luminosa; de ahí que la chispa produzca luz.

Estos ejemplos bastan para advertir la importancia del electrón. Su descubrimiento ha permitido al hombre dar un gran paso adelante en el camino hacia una descripción coherente del mundo físico.

---

* Véase pág. 296.

28 APLICACIONES DE LA ELECTRÓNICA

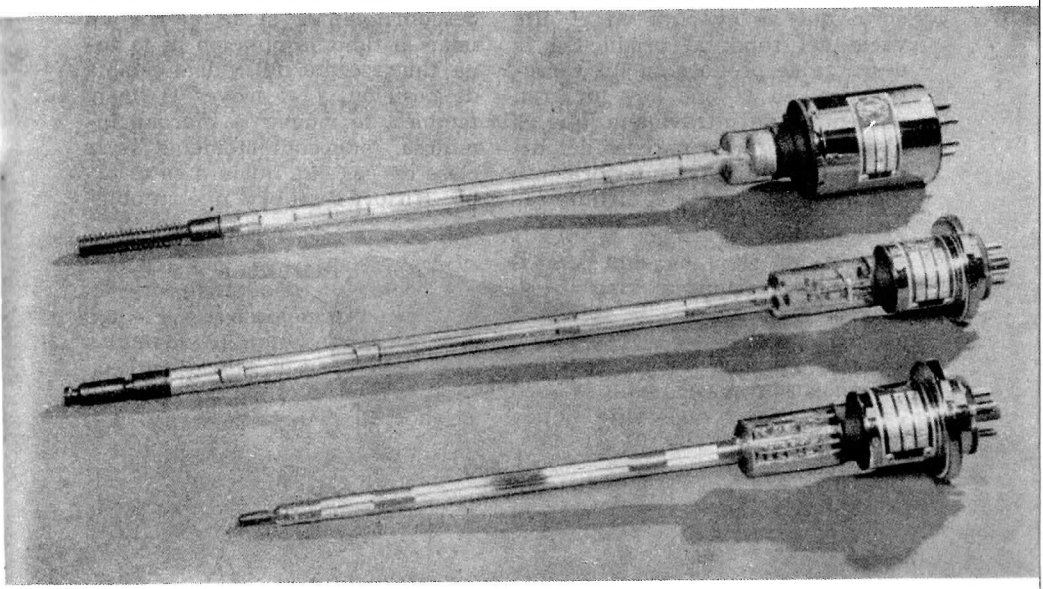
Descargas en gases enrarecidos

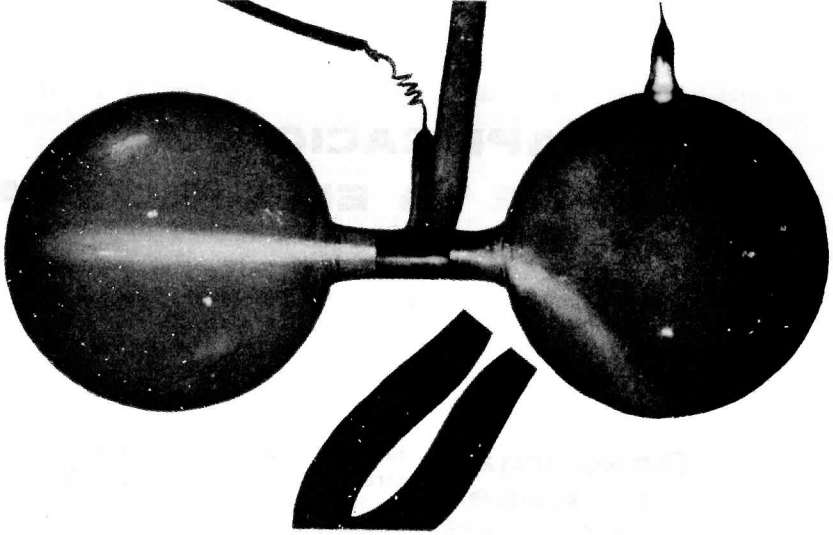
En la parte interior de los extremos de un tubo, se colocan dos discos metálicos llamados electrodos, de los cuales salen al exterior dos alambres terminales.

Al conectar los electrodos con una fuente de alta tensión se observan fenómenos curiosos de hermoso aspecto. Si la presión del aire encerrado es la atmosférica, no hay descarga eléctrica y no se observa nada. Si se va extrayendo el aire, al llegar a unos 8 ó 10 cm Hg se establece una corriente eléctrica, y un haz luminoso violeta se extiende desde el cátodo hasta el ánodo.

El color de la columna luminosa depende del gas que haya dentro del tubo. Si hay aire resulta rosado violáceo; si hay neón, rojo anaranjado; si hay mercurio, azul; si hay helio, amarillo, etc.

Tubos electrónicos.





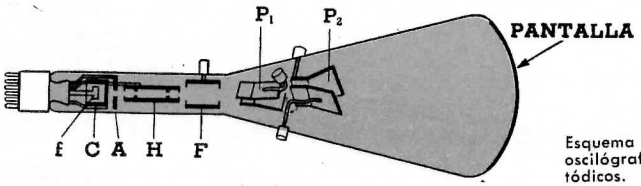
El haz de rayos catódicos es desviado por el campo magnético de un imán. El haz de la izquierda es de rayos positivos o canales (ver capítulo 32).

Si se reduce más la presión, el aspecto de la columna luminosa varía hasta que, al llegar a sólo unos milésimos de mm Hg, desaparece gradualmente, y el vidrio de la zona del ánodo se pone fluorescente, emitiendo una luz verdosa.

Los tubos fluorescentes comerciales generalmente contienen neón y se agrega una gota de mercurio que se evapora en el alto vacío del tubo; al producirse la descarga se produce su luz característica, en la que hay un gran porcentaje de ultravioleta, que es invisible; pero las paredes del tubo están recubiertas interiormente con polvo fluorescente, distinto según el color que se desee obtener, y al incidir la luz ultravioleta sobre la capa de polvo, éste emite luz del color deseado.

Los rayos catódicos

Plücker hizo un importante descubrimiento: si se acerca un imán al tubo, la posición de la zona fluorescente del vidrio cambia de posición, y al mover el imán, también se mueve la mancha luminosa, independientemente de la clase de gas que hubiera en el tubo. Hittorf descubrió que un obje-



Esquema del tubo de un oscilógrafo de rayos catódicos.

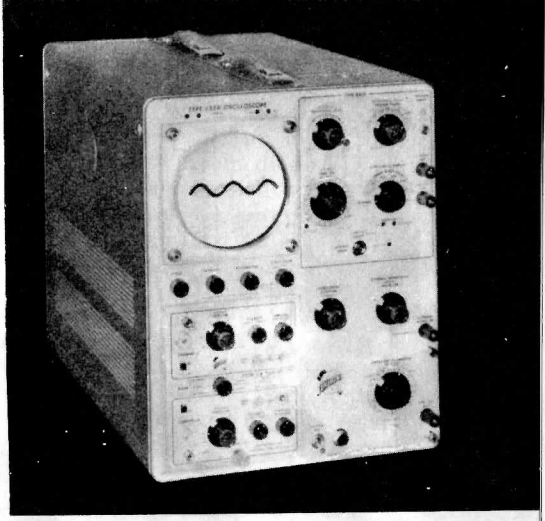
to colocado dentro del tubo hacía sombra en la pared opuesta al cátodo. Entonces se pensó que "algo como rayos" salía del cátodo y se propagaba en línea recta. Para Goldstein, en Alemania, eran radiaciones electromagnéticas del tipo de la luz; para Crookes, en Inglaterra, eran partículas pequeñísimas, un nuevo estado de la materia, emitida por el cátodo. Goldstein los llamó *rayos catódicos*; Crookes, *materia radiante*. Y, cosa curiosa, actualmente se les da el nombre propuesto por Goldstein, habiéndose demostrado que quien tenía razón era Crookes.

La polémica entre ambos duró años, hasta que J. J. Thomson demostró que se trataba de partículas eléctricas negativas, y las llamó *electrones*.

El oscilógrafo de rayos catódicos

La parte fundamental de un oscilógrafo es un tubo de rayos catódicos con una pantalla fluorescente. Antes de llegar a ésta, el haz de electrones pasa por entre dos pares de placas, P_1 y P_2, cada par con las placas paralelas entre sí y perpendiculares a las del otro.

En el esquema *f* es el filamento de calefacción, que calienta al cátodo C, el emisor de electrones. El haz pasa a través de un agujero practicado en el ánodo A y es delimitado por H. Para enfocarlo sobre la pantalla se dispone el cilindro F, cuyo potencial se varía a voluntad. Al chocar con la pantalla fluorescente, el haz produce en su centro un punto brillante. Pero si el par de placas P_1 se conecta



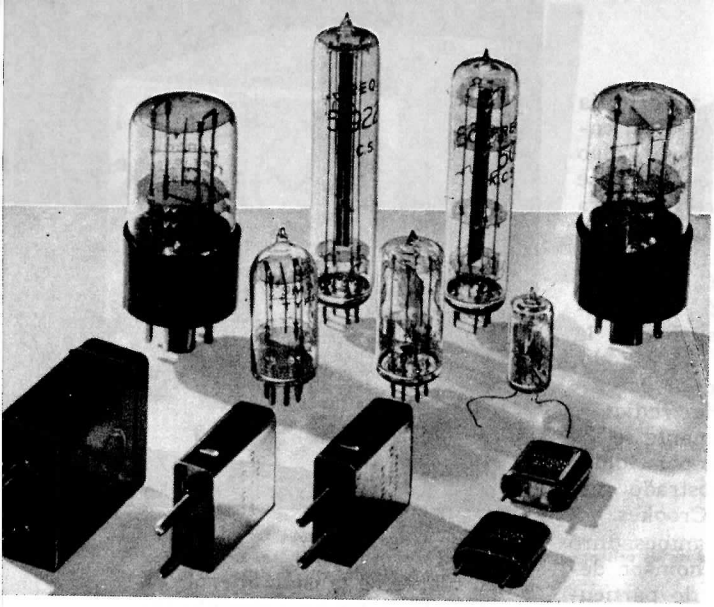
Oscilógrafo de rayos catódicos.

a una fuente de tensión alterna, en la pantalla se ve un segmento luminoso, pues si en un instante dado la placa superior es positiva y la inferior negativa, el haz es atraído hacia arriba; pero luego la polaridad se invierte y el haz es atraído hacia abajo. Al sucederse los cambios continuamente, el punto de incidencia en la pantalla describe el segmento mencionado.

Si, en cambio, se conecta el segundo par, P_2, también se verá un segmento, pero horizontal; y si se conectan los dos pares simultáneamente, se verán distintas curvas, resultado de la trayectoria descripta por el haz.

Para estudiar una fuente de tensión, en general se la conecta con el primer par de placas; el segundo se conecta a una segunda fuente, independiente de la primera, para producir oscilaciones horizontales que permitan ver la forma de las verticales.

El oscilógrafo también se aplica al estudio de las ondas sonoras: con un micrófono conectado con P_1



Válvulas para radio, hechas con cristal de cuarzo.

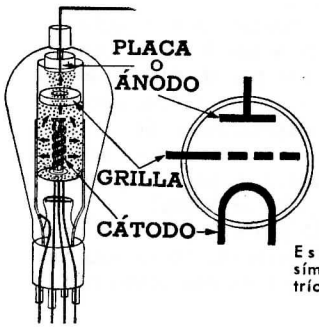
se recoge el sonido que se quiere estudiar, y la pantalla revela la forma de la onda.

La más difundida aplicación de los tubos de rayos catódicos es la televisión. La pantalla de un televisor no es sino la pantalla fluorescente a que nos referimos antes.

Las válvulas electrónicas

Las aplicaciones de las válvulas electrónicas son innumerables y variadísimas. La idea madre de todas es la misma, pero mediante variaciones de una u otra de sus partes fundamentales son aplicables a una u otra funcion.

Sus partes son: 1) el cátodo; 2) el ánodo; 3) la grilla; 4) la envoltura; 5) los terminales para efectuar las conexiones necesarias.



Esquema y símbolo de un tríodo.

El cátodo. Su función es la de proveer electrones, mediante el efecto termoeléctrico, para establecer la corriente.

El material y la forma dependen de la función a que se destine la válvula; generalmente es de un material de alto punto de fusión (tungsteno, 3 000° C), y se lo recubre de una capa de óxidos metálicos que aumentan la producción de electrones.

La corriente y el circuito que calientan el cátodo se llaman *corriente y circuito de calentamiento.*

El ánodo. Su función es atraer los electrones emitidos por el cátodo, y establecer así la corriente

eléctrica. Comúnmente se lo llama *placa*, y por eso a la corriente y al circuito que vincula cátodo con ánodo se los llama *corriente de placa* y *circuito de placa*.

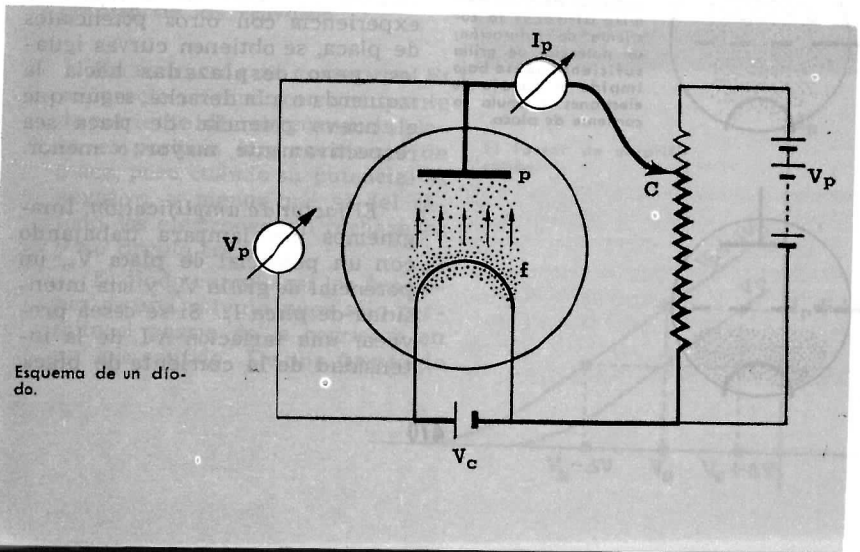
La grilla. Es un tercer electrodo, colocado entre el cátodo y la placa, cuya función es controlar el flujo de electrones hacia la placa, es decir, regular la corriente de placa. Si la grilla es positiva respecto del cátodo, favorece el paso de los electrones; si es negativa, lo retarda, o, si su potencial negativo es suficiente, lo impide.

Las válvulas que no tienen grilla se llaman *díodos*; las que tienen una, *tríodos*; las que tienen dos, *tétrodos*, etc.

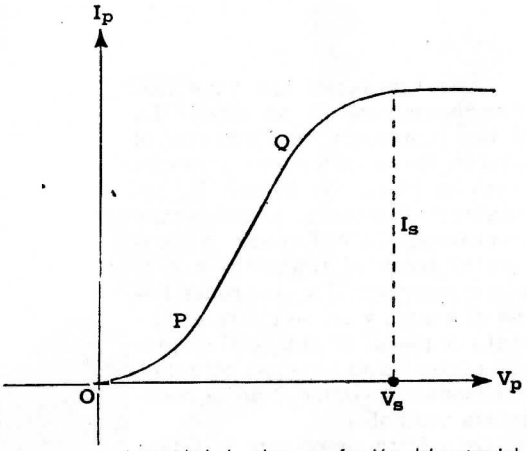
Los terminales y la envoltura. Los terminales permiten establecer las conexiones; la envoltura mantiene dentro de la válvula el alto grado de vacío necesario para su trabajo, y en los tipos de válvulas que contienen gas, mantiene la presión deseada, que siempre es ínfima comparada con la atmosférica.

Cómo trabajan las válvulas. *Funcionamiento de un díodo.* La figura representa un díodo con su circuito de calentamiento y su circuito de placa. La batería V_f calienta el filamento, y éste emite electrones. La diferencia de potencial entre el filamento *f* y la placa *p* arrastra los electrones hacia el ánodo, y así se cierra el circuito de placa. El potencial de placa puede graduarse a voluntad, deslizando el cursor C de la resistencia variable.

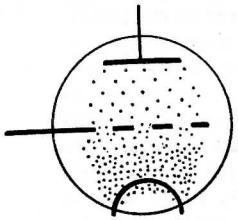
La gráfica representa la intensidad de placa I_p, en función del potencial de placa V_p. Cuando los potenciales de placa son pequeños, la gráfica es una curva, lo que indica que los aumentos de intensidad no son directamente proporcionales a los aumentos de potencial. Pero en la zona comprendida entre P y Q, es recta, y se verifica una proporcionalidad directa. Más allá de Q vuelve a ser curva, cada vez menos creciente, hasta que se transforma en una recta horizontal. Ello significa que, una vez alcanzado el potencial V_s, llamado de *saturación*, se ha llegado a la máxima intensidad de placa, I_s,

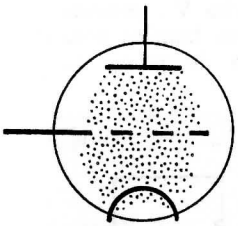


Esquema de un díodo.

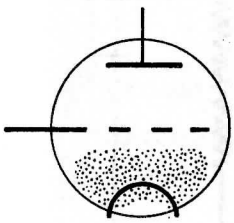


Intensidad de placa en función del potencial de placa.





Un potencial de grilla no muy elevado contribuye a la atracción de electrones; un elevado potencial de grilla permite alcanzar la corriente de saturación; un potencial de grilla suficientemente bajo impide el pasaje de electrones y anula la corriente de placa.



llamada de saturación, y aunque a V_p se le den valores superiores a V_s, la I_p permanece constantemente igual a I_s. Esto se interpreta de la siguiente manera: al establecer V_s, a la placa llegan por segundo, tantos electrones como en 1 segundo son producidos en el filamento; y, claro está, no pueden llegar más electrones que los que son producidos, por más que se aumente V_p.

El tríodo y la función de la grilla. La grilla está colocada entre el cátodo y la placa. Si es positiva con respecto al filamento, contribuye a la atracción de los electrones; si es negativa, los retarda, o, si su potencial es suficiente, anula la corriente de placa al rechazar a todos los electrones emitidos por el cátodo.

La gráfica representa la intensidad de placa en función del potencial de grilla, manteniendo constante el potencial de placa V_p. Si $V_g = 0$ es $I_p = OB$; si se aumenta V_g, también aumenta I_p, hasta alcanzar el valor de saturación; si, en cambio se disminuye V_g, también disminuye I_p, hasta anularse cuando $V_g = OA$. Si se repite la experiencia con otros potenciales de placa, se obtienen curvas iguales, pero desplazadas hacia la izquierda o a la derecha, según que el nuevo potencial de placa sea respectivamente mayor o menor.

El factor de amplificación. Imaginemos una lámpara trabajando con un potencial de placa V_p, un potencial de grilla V_g, y una intensidad de placa I_p. Si se desea provocar una variación ΔI_p de la intensidad de la corriente de placa,

se la puede lograr mediante una variación ΔV_p del potencial de placa, o bien del potencial de grilla, ΔV_g. Ello significa que si se aumenta la V_p en ΔV_p y simultáneamente se disminuye la V_g en ΔV_g, la intensidad de placa I_p permanece constante ($\Delta I_p = 0$).

DEFINICIÓN: *Se llama factor de amplificación* μ, *al cociente entre la variación* ΔV_p *del potencial de placa, y la variación* ΔV_g *del potencial de grilla que provocan las variaciones iguales de* I_p:

$$\mu = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} \text{ (para } \Delta I_p = 0).$$

En un cierto tipo de lámpara, por ejemplo, se necesita una $\Delta V_p = 50$ V para provocar una $\Delta I_p = 0{,}25$ A; y esa misma ΔI_p se logra con una $\Delta V_g = 2$ V; luego:

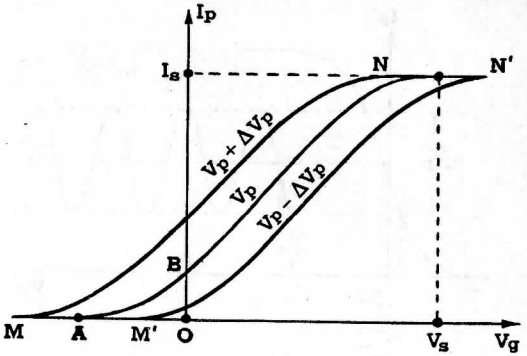
$$\mu = \frac{50 \text{ V}}{2 \text{ V}} = 25$$

Es decir que una variación producida en el potencial de grilla equivale a una variación 25 veces mayor en el potencial de placa.

Empleo de las válvulas

RECTIFICACIÓN DE CORRIENTE. Si se conecta un díodo con una fuente de corriente alterna, cuando la placa es positiva hay corriente de placa, pero cuando su potencial es negativo, y menor que el del cátodo, los electrones son rechazados y no circula corriente.

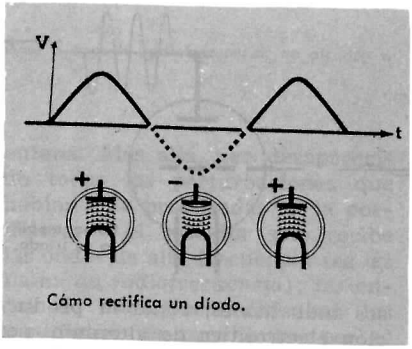
El díodo cumple así las funciones de una válvula, pues sólo permite el pasaje de la corriente en un solo sentido. De una fuente de



La intensidad de placa en función del potencial de grilla.

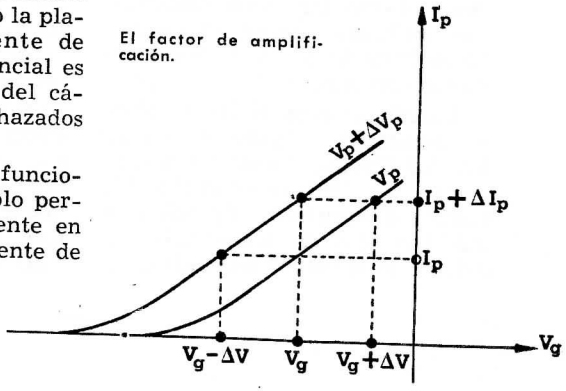
tensión alterna permite obtener golpes de corriente siempre en el mismo sentido.

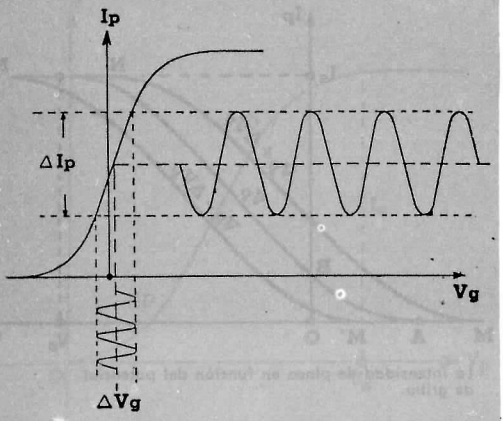
Aplicaciones de la rectificación. Los trenes y tranvías eléctricos y los trolebuses, los procesos de galvanoplastia y otros muchos proce-



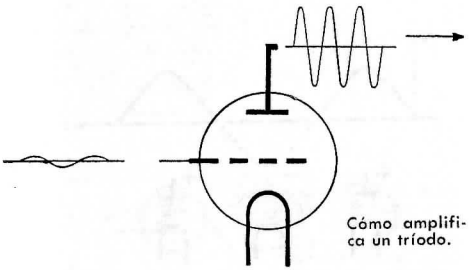
Cómo rectifica un díodo.

El factor de amplificación.





Una pequeña variación ΔVg del potencial de grilla provoca una variación de la corriente de placa; ésta, a su vez, corresponde a una variación del potencial de placa μ veces mayor que el de la grilla. Como consecuencia, una pequeña variación del potencial aplicado a la grilla significa una gran variación del potencial aplicado a la placa.



Cómo amplifica un tríodo.

sos industriales, como la producción electrolítica de aluminio, por ejemplo, necesitan corriente continua. Como las usinas suministran corriente alterna, es necesario rectificarla, y ello se hace mediante válvulas.

La importancia de las válvulas rectificadoras es tanta que en los Estados Unidos, durante la última guerra, se calcula que con ellas fue posible reemplazar maquinarias que tan sólo en acero hubieran exigido unas 20 000 toneladas.

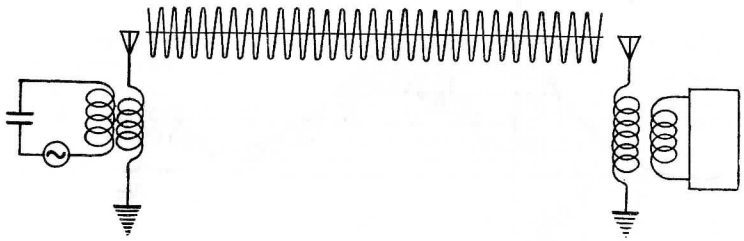
AMPLIFICADORA DE SEÑALES. Si se tiene un potencial alterno demasiado débil para ser usado directamente, se lo aplica a la grilla. Por pequeño que sea, ese potencial afecta al flujo de electrones, y la corriente de placa revela, amplificada, la señal (potencial), aplicada a la grilla.

Aplicaciones. Una de las más difundidas es la amplificación de las señales radiotelefónicas. Los más pequeños impulsos eléctricos pueden ser captados mediante lámparas. Sería inacabable la lista de las aplicaciones; citemos, como curiosidad, que las imágenes que superpuestas forman una fotografía en colores de un diario o una revista, en algunos sistemas de impresión, se ubican con máxima exactitud mediante válvulas electrónicas, y que la carencia de éstas hace que el trabajo sea impreciso y que los colores aparezcan a veces mal superpuestos.

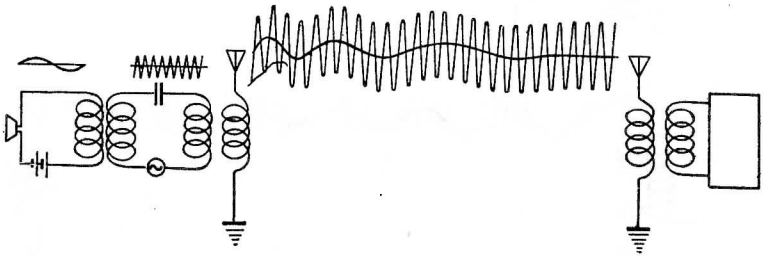
Idea de la radiotelefonía

Vimos cómo se pueden emitir ondas electromagnéticas y cómo se las puede detectar. Mediante un emisor, un receptor y un código de señales, se pueden comunicar dos puntos cualesquiera de la Tierra, y en ello consiste la radiotelegrafía.

El problema de la radiotelefonía consiste en excitar un emisor de tal manera que las ondas electromagnéticas estén perturbadas por sonidos, de modo tal que sus perturbaciones puedan transformarse en el receptor, en los mismos sonidos emitidos ante el transmisor.



Transmisión de una onda de radiofrecuencia.

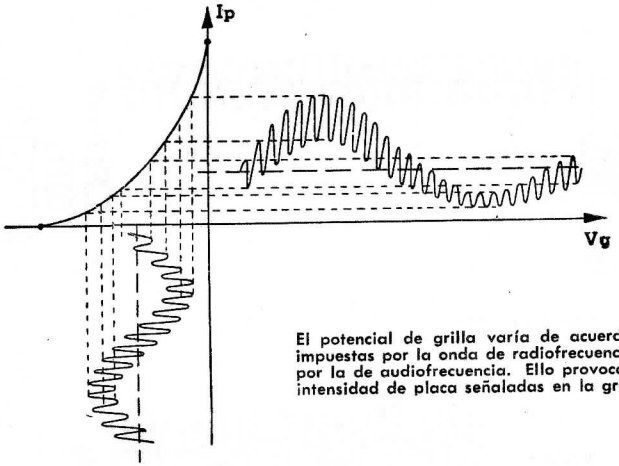


Una onda de audiofrecuencia superpuesta simplemente a una de radiofrecuencia, no alcanza a propagarse muy lejos.

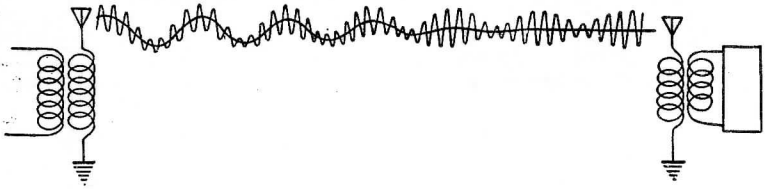
Emisión de las ondas

El primer problema es, pues, cómo lograr que un sonido modifique una onda electromagnética. En primera instancia la solución es sencilla y conocida: el micrófono. Si a la onda electromagnética emitida por el transmisor, a la que llamaremos "portadora", simplemente se le superponen las modificaciones provocadas por el sonido en el micrófono, la onda resultante tiene el aspecto de la figura. Pero ondas de tan larga longitud, o sea, de tan baja frecuencia, tienen un alcance reducidísimo, y apenas llegan a unos metros de la antena. Más allá, han desaparecido todas las perturbaciones que habían sido provocadas en la portadora, y el receptor sólo recibe las ondas de alta frecuencia (se las llama de *radiofrecuencia*); las ondas de *audiofrecuencia* (son las modificaciones provocadas por el sonido en la portadora) no llegan al receptor.

El problema se resuelve mediante un tríodo. Hemos visto cómo las variaciones del potencial de grilla inciden sobre la intensidad de la corriente de placa. Al potencial de grilla se le superpone el potencial de radiofrecuencia y también el de audiofrecuencia. Si se trabaja en la zona de potenciales indicada en la gráfica, la inten-



El potencial de grilla varía de acuerdo con las variaciones impuestas por la onda de radiofrecuencia y, simultáneamente, por la de audiofrecuencia. Ello provoca las variaciones de la intensidad de placa señaladas en la gráfica.



Mediante la grilla se ha modificado la amplitud de la onda de radiofrecuencia, y esas variaciones de amplitud constituyen las ondas de audiofrecuencia.

sidad de la corriente de placa (y con ello la onda electromagnética) tiene la forma que aparece arriba y a la derecha del gráfico.

Dijimos anteriormente que las vibraciones de frecuencia del orden de las sonoras no alcanzan a propagarse a distancias apreciables de la antena transmisora, de modo que a poco de emitidas, las ondas de radiofrecuencia "se enderezan", digamos así, y presentan el aspecto de la figura. Pero han sido perturbadas en forma tal que su amplitud no es constante sino variable, y la frecuencia con que varía la amplitud de la onda de radiofrecuencia es, precisamente, la frecuencia del sonido que la perturbó, es decir, la audiofrecuencia.

Se ha logrado imprimir sobre la onda de radiofrecuencia, modificaciones periódicas de una frecuencia igual a la del sonido que se quiere transmitir: se tiene una onda de radiofrecuencia MODULADA, con modulación de su amplitud.

Resuelto el primer problema, el receptor debe ahora captar la onda de radiofrecuencia, de alguna manera poner de manifiesto sus modulaciones y transformarlas en sonidos.

El aparato receptor

El aparato receptor es, en esencia, un circuito oscilante. Si se lo pone en resonancia con el transmi-

sor, las ondas transmitidas, al llegar a él, lo harán entrar en oscilación con una frecuencia igual a la de la onda portadora (radiofrecuencia). Se puede ensayar colocando un teléfono en el circuito, pero no se oirá nada, por dos razones:

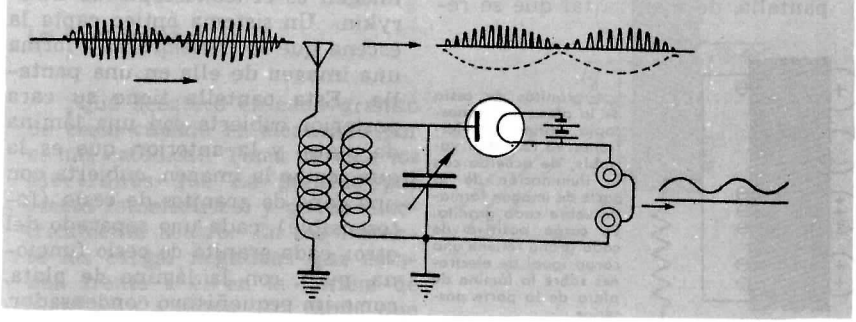
1. Si la membrana elástica del teléfono pudiera vibrar, el sonido producido sería excesivamente alto para ser captado por el oído humano;

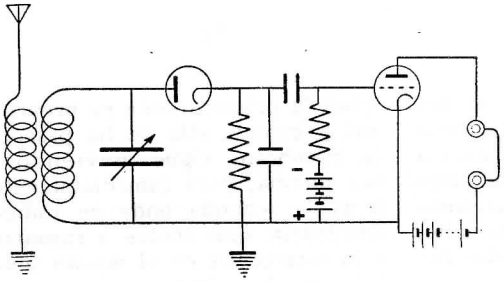
2. La membrana no puede vibrar, pues su inercia mecánica se lo impide, para frecuencias tan elevadas como las de radiofrecuencia.

El problema se resuelve con un díodo, como indica la figura. Éste hace de rectificador: sólo deja pasar corriente en un sentido. Cuando llega la onda modulada, la primera de las ondas de radiofrecuencia empuja a la membrana y la saca de su posición de equilibrio. Como la frecuencia de esas ondas es elevada, el tiempo que actuó la primera onda es brevísimo, y cuando ella ya ha pasado, la membrana sigue moviéndose por inercia; pero inmediatamente llega la segunda onda de radiofrecuencia, que vuelve a empujar a la membrana *en el mismo sentido* que la primera; y luego, las siguientes. Como el díodo sólo deja pasar corriente en un sentido, todas las ondas de radiofrecuencia han empujado a la membrana en un mismo sentido, cada una con una intensidad proporcional a su amplitud máxima. Por lo tanto, la separación de la membrana de su posición de equilibrio en cada instante, es proporcional a la amplitud en cada instante de la onda de audiofrecuencia, y la membrana reproduce todas las variaciones de esta onda, es decir, el sonido original.

En general, la energía recibida por el teléfono de esta manera es pequeña, de modo que la audición es muy débil. Se la mejora instalando en el circuito un tríodo como amplificador.

El díodo solamente deja pasar las semiondas en un sentido; el teléfono (o el parlante) sólo capta los máximos de las ondas de radiofrecuencia, es decir, las ondas de audiofrecuencia.





El tríodo amplifica las ondas recibidas por el díodo, y en consecuencia el sonido es más intenso.

En el circuito de la figura, el cátodo del díodo rectificador se ha conectado con la grilla del tríodo amplificador. Éste está en la rama del circuito total que contiene los teléfonos, y una batería que establece la corriente de placa (la de calentamiento del filamento del díodo y la del tríodo se han omitido para simplificar el dibujo), que circula siempre. Las variaciones detectadas por el díodo son transmitidas a la grilla, y perturban la corriente de placa del tríodo. Estas perturbaciones son una imagen fiel, pero amplificada, de aquéllas. Así, la membrana del teléfono vibra con mayor energía que si estuviera conectada directamente con el díodo.

Idea de la televisión

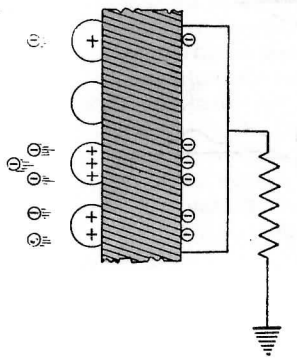
El problema consiste en transmitir una imagen formada en una pantalla, de manera tal que se reproduzca en otra pantalla situada a varios kilómetros de distancia.

El problema tiene una complicación más que el de transmitir sonidos, pues éstos se suceden unos a otros, mientras que una imagen consta de muchos elementos que se deben ver simultáneamente.

La solución consiste en: 1) *descomponer la imagen formada en el transmisor en muchísimas partes (elementos de imagen);*

2) *transmitir los elementos de imagen uno detrás de otro;*

3) *recibir esos elementos y ubicarlos en una pantalla uno tras otros de modo que recompongan la imagen inicial, en un tiempo menor que el que persiste cada elemento de imagen en la retina.*



Los granitos de cesio de la placa del iconoscopio emiten fotoelectrones en cantidad variable, de acuerdo con la iluminación de la parte de imagen formada sobre cada granito. La carga positiva de cada grano retiene una carga igual de electrones sobre la lámina de plata de la parte posterior.

La descomposición de la imagen

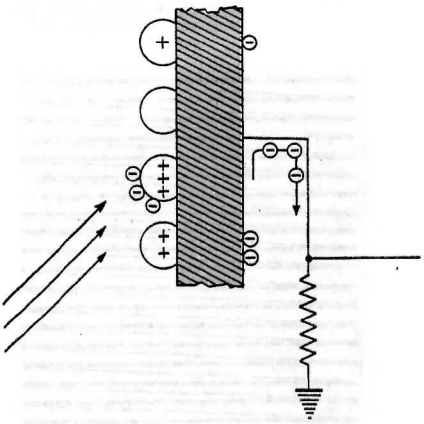
El aparato que descompone la imagen es el *iconoscopio* de Zworykin. Un sistema óptico capta la escena que se transmitirá, y forma una imagen de ella en una pantalla. Esta pantalla tiene su cara posterior cubierta con una lámina de plata, y la anterior, que es la que recibe la imagen, cubierta con una capa de granitos de cesio (fotosensible), cada uno separado del otro: cada granito de cesio funciona, pues, con la lámina de plata, como un pequeñísimo condensador.

Cuando sobre la capa de cesio se ha formado la imagen, cada granito emite electrones (efecto fotoeléctrico) en mayor o menor cantidad según la iluminación del elemento de imagen que le corresponde. Cada granito de cesio queda así con una carga positiva, tanto mayor cuanto más electrones ha emitido. En la lámina de plata de la parte posterior de la pantalla, frente a cada granito de cesio se sitúan tantos electrones como ha perdido el correspondiente granito.

Ahora se dirige un haz de rayos catódicos (electrones) sobre la imagen, de modo que la vaya recorriendo desde el ángulo superior izquierdo de la pantalla hasta el superior derecho, en línea recta; desde ahí se hace volver el haz hacia el ángulo superior izquierdo, pero algo más abajo del punto de partida, y nuevamente se le hace recorrer un segmento horizontal: y así sucesivamente hasta que el haz haya "barrido" o "explorado" toda la imagen. Todo ello en 1/25 de segundo. Cuando el haz termina de barrer una imagen, se lo hace volver al ángulo superior izquierdo, donde comienza a barrer la imagen siguiente, etc.

Un tubo orthicon de televisión es introducido en el tester para ser probado.

Al incidir el haz explorador sobre cada granito de cesio, la provee de los electrones que había perdido; con ello se descargan a tierra los electrones de la lámina de plata.



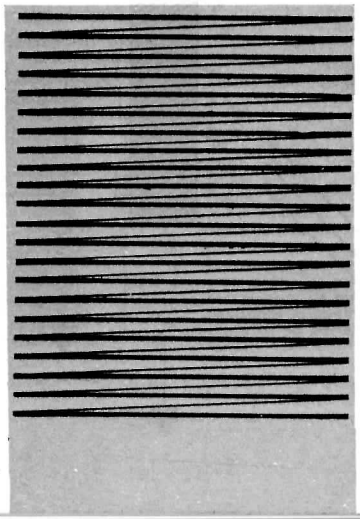
La transmisión

¿Qué acontece en cada granito de cesio cuando es alcanzado por el haz catódico? Toma de éste los electrones que ha perdido por efecto fotoeléctrico, y queda eléctricamente neutro. En ese instante las cargas negativas que estaban frente a él en la lámina de plata, van a tierra. De modo que

Control central en los estudios de televisión de Ulster TV Ltd., Belfast, que utilizan los equipos Marconi.

al paso del haz se van produciendo corrientes eléctricas cuyas intensidades están vinculadas con la luminosidad del elemento de imagen que generó a cada una de esas corrientes. El conductor por donde la lámina de plata se descarga a tierra se coloca con la grilla de una válvula, y cada corriente produce la perturbación necesaria en la onda electromagnética que llevará consigo la "imagen latente".

Cómo es el barrido, tanto en el iconoscopio como en la pantalla del receptor.



La recepción

En esencia, el receptor es un tubo de rayos catódicos. Al haz se lo hace recorrer la pantalla de izquierda a derecha y de arriba hasta abajo de modo que un "barrido" completo se realice en 1/25 de segundo.

Las ondas electromagnéticas recibidas actúan sobre el haz catódico del receptor de manera que, cuando en la pantalla del transmisor el haz explorador incide sobre un elemento de imagen muy luminoso, el haz catódico del receptor es muy intenso, y su punto de incidencia en la pantalla fluorescente del receptor resulta muy brillante. Al revés, cuando el haz explorador incide sobre un elemento de imagen oscuro, el haz catódico del receptor es pobre en electrones, y su punto de incidencia en la pantalla es poco luminoso.

Como el barrido completo de la pantalla se hace en 1/25 de segundo, en el ojo persisten simultáneamente las imágenes producidas por un conjunto de puntos de diferente luminosidad. Como éstos son pequeñísimos, se tiene la misma sensación que al ver una película cinematográfica.

29 LOS RAYOS X

Cómo se descubrieron

En 1895, se descubrió el efecto más importante de los rayos catódicos: la producción de rayos X. Su descubridor fue Guillermo Conrado Roentgen, profesor de física de la Universidad de Wurzburgo, Alemania, quien en esa época tenía 50 años de edad.

Guillermo C. Roentgen (1845-1923).

En 1896 un periodista estadounidense tuvo una entrevista con él, de la que transcribimos algunos párrafos*:

"¿Podría contarme la historia de su descubrimiento, Profesor?".

"Mi descubrimiento no tiene historia" –replicó Roentgen–. "Desde hacía tiempo estaba interesado en el problema de los rayos catódicos. Seguí investigaciones realizadas por Hertz, Lenard y otros investigadores, y decidí hacer algunas investigaciones por mi cuenta cuando tuviera tiempo. Hacía algunos días que estaba trabajando sobre el tema, cuando descubrí algo nuevo."

"¿Qué día fue?"

"El 8 de noviembre de 1895."

"¿Cuál fue el descubrimiento?"

"Estaba trabajando con un tubo de Crookes, recubierto con un cartón negro; sobre la mesa había una hoja recubierta con platinocianuro de bario, y estaba haciendo pasar una corriente a través del tubo cuando noté una línea brillante a lo largo del papel."

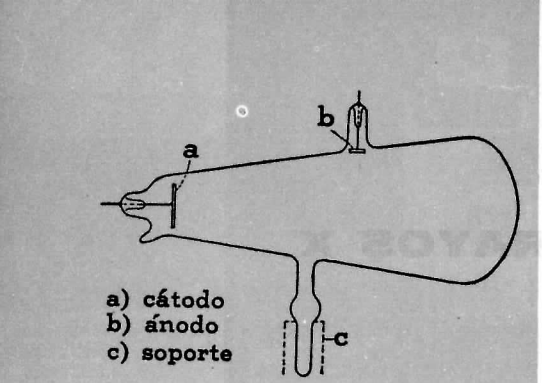
"¿Qué era?"

"El efecto sólo podía ser producido por el pasaje de luz; pero del tubo no podía venir luz porque la hoja de cartón que lo cubría era completamente opaca a cualquier luz conocida, aún la de un arco eléctrico."

"¿Y usted qué pensó?"

"Yo no pensé: investigué. Supuse que el efecto debía de venir del lado del tubo, porque su carácter indicaba que no podía venir de otra parte. Probé. En pocos minutos no había duda: del tubo venían rayos que tenían un efecto luminoso sobre el papel fluores-

* Tomada de "The story of X ray".



Tubo semejante al empleado por Roentgen.

cente. Ensayé a distancias cada vez mayores, hasta dos metros. A primera vista parecía una nueva clase de luz invisible. Era, evidentemente, algo nuevo no registrado hasta entonces."

"¿Es luz?"

"No."

"¿Es electricidad?"

"No, en ninguna forma conocida, por lo menos."

"Entonces, ¿qué es?"

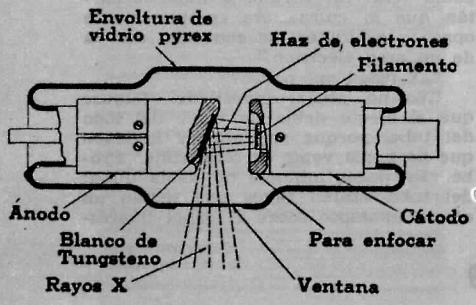
"No sé . . ."

Y los llamó *rayos X*. Actualmente también se les da el nombre de *rayos Roentgen*.

Cómo se producen

Si la diferencia de potencial entre los extremos de un tubo de descargas en el vacío alcanza valores suficientemente elevados (decenas o centenas de miles de volts), los electrones, acelerados por el campo eléctrico, adquieren velocidades enormes, y, por consiguiente, una gran energía. Al chocar con el ánodo, cada electrón pierde esa energía, que es emitida en forma de energía radiante: *rayos X*.

Modelo de tubo de Coolidge, semejante a los empleados actualmente.



El tubo de Coolidge

Una mejora muy importante en los tubos de rayos X fue introducida en 1913 por William D. Coolidge, investigador de la General Electric Co. Hasta entonces los tubos eran del tipo Crookes, y presentaban el inconveniente de ser irregulares en su comportamiento. Coolidge, que por primera vez había logrado hacer filamentos de tungsteno para aplicarlos en las lámparas de incandescencia, fabricó un tubo de rayos X cuyo cátodo es un filamento de tungsteno por el cual se hace pasar una corriente eléctrica; en esas condiciones, el cátodo se pone incandescente y emite electrones que, acelerados por un campo eléctrico, producen los rayos X al chocar contra el ánodo.

La ventaja de este tubo, que es el que actualmente se usa, consiste en que se puede variar la corriente de calentamiento, y con ello la cantidad de electrones emitidos por segundo, y por consiguiente, la cantidad de rayos X producida por segundo; esto no se puede hacer con un tubo de Crookes.

Por otra parte, también se puede graduar la diferencia de poten-

cial entre cátodo y ánodo –como en el tubo de Crookes–, y con ello la velocidad de los electrones.

ALGUNAS PROPIEDADES. En su primera comunicación, modelo de trabajo científico, Roentgen enunció ya muchas de las propiedades de los rayos X, entre ellas:

1) Todas las sustancias, en mayor o menor grado, son transparentes para los rayos X.

2) Cuanto mayor es la diferencia de potencial aplicada al tubo, tanto mayor es el poder de penetración de los rayos X. En efecto: a mayor diferencia de potencial corresponde mayor velocidad adquirida por los electrones; por lo tanto, éstos llegan al ánodo con mayor energía, y como esa energía es la que se transforma en energía radiante bajo la forma de rayos X, éstos alcanzan a penetrar mayor cantidad de sustancia antes de ser absorbidos por la materia en la que penetran.

3) Las placas fotográficas son sensibles a los rayos X.

4) Los rayos X no son desviados por campos eléctricos ni magnéticos.

5) Si un cuerpo eléctricamente cargado es iluminado con rayos X, se descarga (efecto fotoeléctrico de los rayos X).

6) Para iguales espesores de sustancia, el poder penetrante es tanto mayor cuanto menos densa es la sustancia.

¿Qué son los rayos X?

Entre las propiedades de los rayos X encontramos la 4), que permite afirmar que no son corpúsculos eléctricamente cargados. Entonces, ¿serán radiaciones del tipo de las luminosas? La manera de probarlo es intentar producir difracción con una ranura, o con una red. Se hizo la experiencia con una red como las empleadas en óptica, y el resultado fue negativo: no se observó difracción.

LA SUGESTIÓN DE VON LAUE. En 1912 el físico alemán von Laue sugirió que la prueba de la naturaleza ondulatoria de los rayos X podría hallarse haciendo incidir un haz de rayos sobre un cristal de cloruro de sodio. Para ello razonaba así:

1. La energía de los electrones que chocan contra el ánodo se transforma en energía de los rayos X emitidos. Aquélla es $e\,V$ (e, carga del electrón; V, potencial aplicado al tubo); si los rayos X son de naturaleza ondulatoria, la energía del "rayo X" producido por un electrón es $h\,\nu$ (h, constante de Planck $= 6{,}61 \times 10^{-27}$ ergs · segundo; ν, frecuencia de la radiación)*. Luego será:

$$h\,\nu = e\,V \;\therefore\; \nu = \frac{e\,V}{h} \cong$$

$$\cong 3 \cdot 10^{8}\,\frac{1}{\text{seg}} \quad (\text{con } V = 10^{4} \text{ volts})$$

A una radiación de esa frecuencia corresponde una longitud de onda de aproximadamente 10^{-8} cm. Por lo tanto, será inútil intentar producir difracción de rayos X con cualquier ranura o red empleada en óptica, porque sería como pretender difracción luminosa con ranuras de 10 cm de ancho.

* Véase capítulo 30.

2. Hay poderosas razones para pensar que en un cristal los átomos que lo componen están dispuestos ordenadamente, ocupando vértices de figuras geométricas. En el cloruro de sodio, por ejemplo, ocuparían los vértices de cubos: en un vértice un átomo de cloro, en el siguiente uno de sodio, en el siguiente uno de cloro, etc.

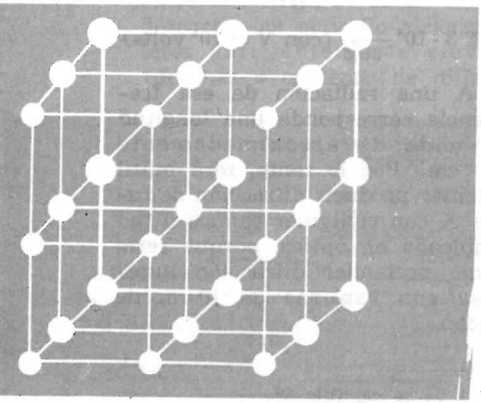
Como la masa molecular del cloro es 35,5 y la del sodio 23, la masa molecular del cloruro de sodio es 58,5; es decir, que en $m = 58{,}5$ g de cloruro de sodio hay $N = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ moléculas (N, número de Avogadro). Esa masa ocupa un volumen V, dado por

$$V = \frac{m}{\delta}$$

(δ, densidad del cloruro de sodio).

Si en ese volumen V hay N moléculas, hay 2 N átomos; por lo tanto en 1 cm³ hay $2\,N\,\delta/m$ (1).

La estructura de un cristal de sal común.



Por otra parte, si los centros de dos átomos consecutivos están separados por una distancia a (a, arista del cubo), en una longitud de 1 cm se encontrarán $1/a$ átomos, y por lo tanto en 1 cm³ habrá $(1/a)^3$ átomos (2).

Igualando (1) y (2)

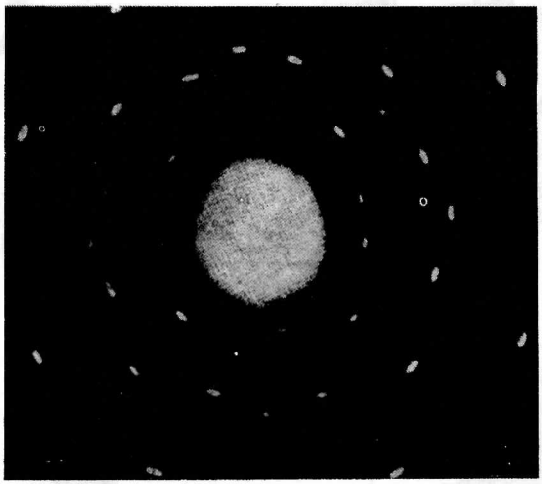
$$\frac{1}{a^3} = \frac{2\,N\,\delta}{m} \quad \therefore$$

$$\therefore \quad a = \sqrt[3]{\frac{m}{2\,N\,\delta}} \cong 3 \cdot 10^{-8}\ \text{cm}$$

Si verdaderamente los cristales de cloruro de sodio están constituidos como se supone, constituyen una red de difracción, con la particularidad de ser especial y no plana como las de óptica. Además, los interespacios entre los "retículos" son de un ancho comparable con la longitud de onda que deberían tener los rayos X, si es que son ondas.

Por lo tanto, pensó von Laue, si las dos hipótesis son ciertas (constitución cristalina, y naturaleza ondulatoria de los rayos X), al incidir un haz de rayos X sobre un cristal de cloruro de sodio debe producirse difracción: cada átomo (equivalente al borde de la ranura de una red óptica) debe transformarse en un centro emisor de ondas (hipótesis de Huygens), las cuales interferirán entre sí, anulándose en unas zonas y reforzándose en otras. Si detrás del cristal se coloca una placa fotográfica, en los máximos aparecerán manchas luminosas.

La experiencia de Friedrich y Knipping. Von Laue indicó a dos de sus discípulos, Friedrich y Knipping, que realizaran una experiencia como la delineada más

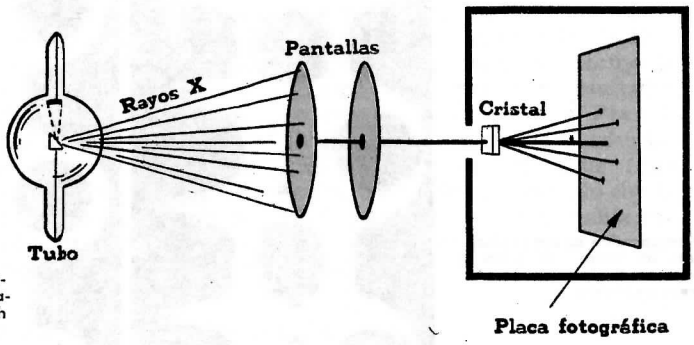


Espectro de difracción de rayos X.

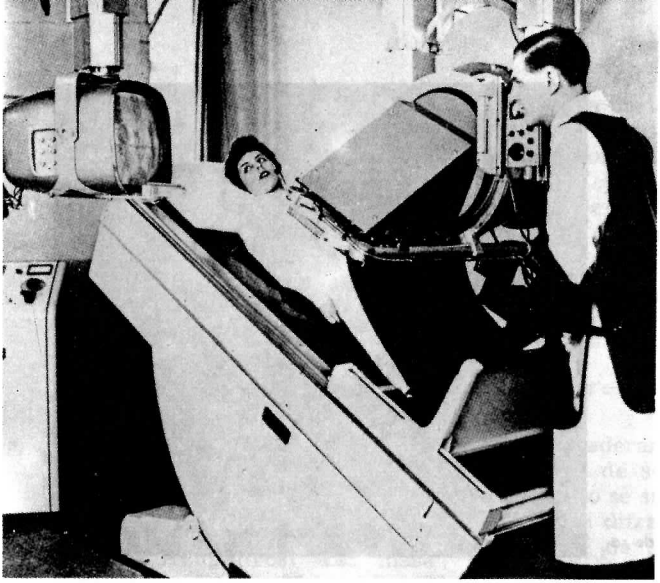
arriba. Con un dispositivo como el esquematizado en la figura se obtuvieron fotografías de difracción de rayos X, semejantes a la que ilustra esta página.

Aceptando como dato que la distancia entre átomos era $a = 3 \times 10^{-8}$ cm, calcularon las longitudes de onda que deberían tener los rayos X para que se reforzaran donde aparecían las manchas, y encontraron varias longitudes, comprendidas entre $1{,}3 \cdot 10^{-9}$ cm y $4{,}8 \cdot 10^{-9}$ cm. Es decir, que los rayos X empleados para esa experiencia son radiaciones de longitudes de onda unas 30 000 veces menores que las de la luz visible.

APLICACIONES. A los tres meses del descubrimiento, en un hospital de Viena se aplicaron rayos X con fines quirúrgicos. Desde entonces su difusión en medicina es tan amplia y conocida que nos relevan de mayores comentarios.



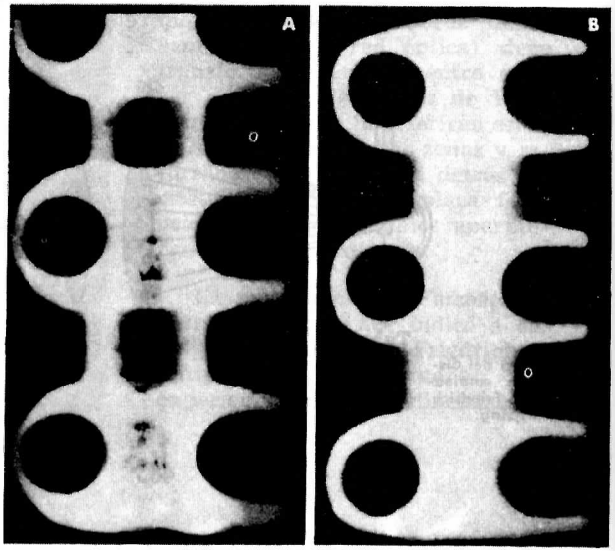
Esquema del dispositivo empleado por Friedrich y Knipping.



Aparato de rayos X.

Menos conocidos son sus usos en la industria, por ejemplo para revelar fallas en metales. Pero independientemente de las aplicaciones en la práctica los rayos X tienen enorme importancia en la física experimental y teórica, pues mediante ellos se han realizado importantísimos avances en el conocimiento de la estructura interior de los átomos.

Actualmente se han producido rayos X de 2 000 millones de *e* V energía, lo que significa una longitud de onda de 10^{-13} cm, que, como veremos, es algo menor que los radios de los núcleos atómicos. Se los emplea para estudiar fenómenos fundamentales en la física del núcleo.



Comparación de dos fundiciones de hierro. La pieza A muestra las fallas de un proceso incorrecto.

30 LA TEORÍA DE LOS CUANTOS

El origen de la teoría

La física moderna nació hacia el año 1900, cuando dos teorías conmovieron hasta sus cimientos el edificio de la física: la *teoría de los cuantos*, de Max Planck, y la *teoría de la relatividad*, de Alberto Einstein.

La física moderna es revolucionaria porque sus aplicaciones han modificado la forma de vivir del hombre, pero la mayor modificación es el cambio radical de conceptos considerados hasta entonces inconmovibles.

La teoría de los cuantos tuvo su origen en el estudio de la radiación emitida por un cuerpo negro. La física teórica, al querer describir esa radiación y formular sus leyes, descubrió que sus conclusiones no correspondían a los datos experimentales. Cuando un razonamiento correcto conduce a conclusiones que no están de acuerdo con la experiencia* los experimentos no están bien hechos, o a la teoría le faltan datos para hacer un razonamiento que conduzca a la verdad científica. En el estudio de la radiación de un cuerpo negro, los experimentos estaban impecablemente realizados y el genio y la audacia de Planck dieron con el dato que faltaba.

En alguna parte del desarrollo teórico se cometía un error, "algo" se daba por sentado que debía ser falso, pero que debía de aparecer como muy natural, puesto que escapaba a los mejores físicos. Planck analizó cuidadosamente cada afirmación que se admitía como cierta para poder usarla en el mecanismo matemático que conduciría a la ley descriptiva del fenómeno, y halló la afirmación falsa: se admitía que la energía emitida por un cuerpo caliente variaba gradualmente al variar la temperatura, *pasando de un valor a otro infinitamente cercano.* Admitirlo parece natural, y, además, la física lo había aplicado anteriormente a otros problemas, con resultados correctos, pero cuando Planck analizó esa afirmación advirtió que sólo era una hipótesis (que podía, o no, estar de acuerdo con la realidad física), pues no había razón teórica ni experimental que la sustentara.

* Véase Introducción a la Física, tomo I, pág. 105.

Ensayó la hipótesis opuesta, es decir, que las variaciones de la energía *se hacen por saltos*, como "por granitos" de energía. Dio forma matemática a esta suposición, la empleó en sus operaciones, y llegó a una fórmula que describe la radiación de un cuerpo negro en perfecta concordancia con los hechos experimentales.

Como la teoría y la experiencia concordaron, había obtenido una verdad científica: la ley de la radiación de un cuerpo negro. Y en la búsqueda de esa verdad descubrió algo mucho más importante, *una de las claves para descifrar el lenguaje con que la naturaleza nos habla de sus secretos: la teoría de los cuantos.* Para dar una idea de ella aprovecharemos el efecto fotoeléctrico.

Las leyes del efecto fotoeléctrico

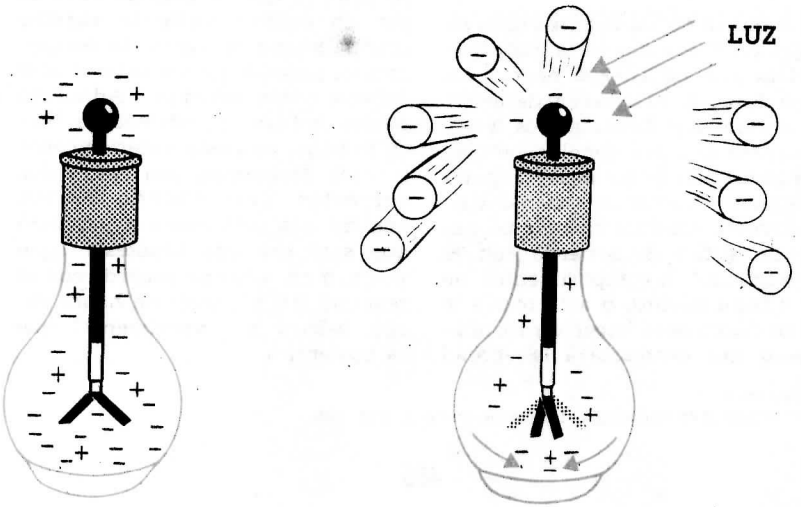
Hagamos incidir un haz de luz sobre una superficie metálica. En ciertas condiciones –que aclararemos más adelante– la luz arranca electrones al metal, y ese fenómeno se conoce con el nombre de *efecto fotoeléctrico.*

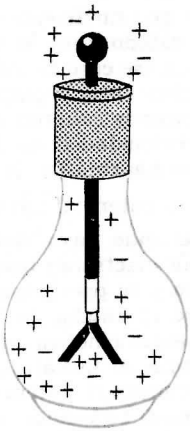
No hay dificultades experimentales para medir el número y la velocidad de los electrones arrancados, y se puede realizar una serie de experiencias para estudiar los *fotoelectrones* y las leyes de la *emisión fotoeléctrica.*

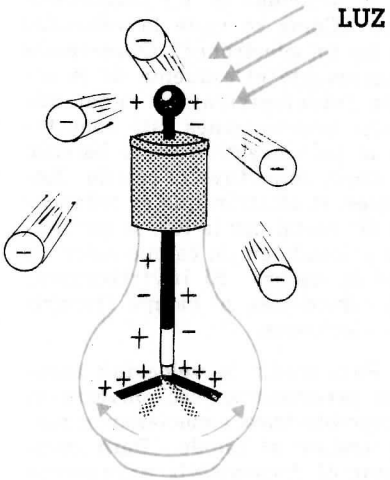
Primer experimento. En primer lugar, veamos cómo se puede mostrar que el efecto fotoeléctrico verdaderamente existe.

El electroscopio de la figura fue cargado *negativamente*, o sea que tiene cargas positivas y negativas, pero prevalecen estas últimas. Como está aislado conserva sus cargas negativas (electrones): lo prueba el hecho de que las hojuelas se conservan separadas.

Al iluminar el electroscopio con una luz (preferentemente azul o violeta, por lo que luego se verá), se observa que el ángulo entre las hojuelas *disminuye.* Ello significa que el electroscopio –a pesar de estar aislado– pierde cargas negativas: *la luz arranca electrones al metal.*





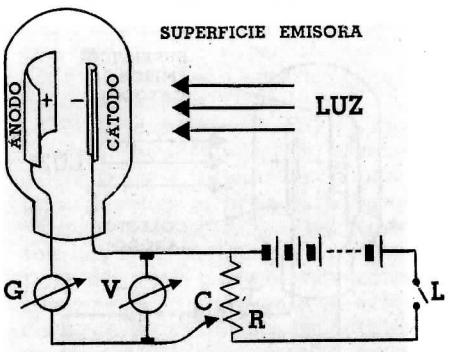


Segundo experimento. Carguemos *positivamente* el electroscopio, lo que significa que las cargas positivas prevalecen sobre las negativas.

Al iluminar el electroscopio se observa que el ángulo entre las hojuelas *ahora aumenta.* Ello significa que aumenta el exceso de cargas positivas: *la luz arranca electrones al metal.*

Tercer experimento: la relación entre la iluminación del metal emisor y la intensidad de la corriente fotoeléctrica.

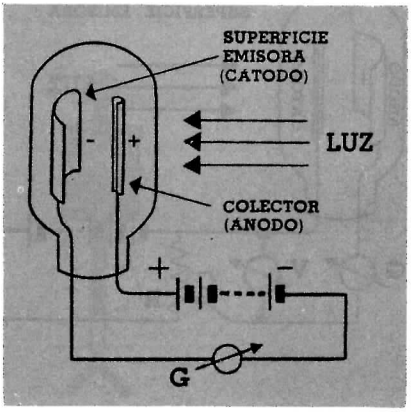
Consideremos el circuito siguiente. Iluminemos la célula fotoeléctrica con una iluminación *I* pequeña; entonces observaremos en el galvanómetro una corriente de intensidad *i*. Aumentemos la iluminación a *2 I*, luego a *3 I*, luego a *4 I*, etc.; entonces veremos que la intensidad de la corriente (dentro de ciertos límites) crece al doble, *2 i*; al triple, *3 i*, a *4 i*, etc. Esto es comprensible: al llegar más luz, arranca más electrones; y como circulan más electrones, la corriente crece en intensidad.



Cuarto experimento: medición de la velocidad de los fotoelectrones. ¿Cómo se mide la velocidad de los fotoelectrones? Observemos nuevamente el esquema de la célula fotoeléctrica: el metal que emite fotoelectrones está conectado al polo negativo de la batería; es decir, constituye el cátodo. Entonces, el electrón que es arrancado del metal por la luz, se encuentra colocado en un campo eléctrico que lo acelera. Si invirtiéramos las conexiones, el campo frenaría los electrones.

Para medir la velocidad hacemos precisamente eso: invertir el campo eléctrico, conectando el metal emisor al ánodo. Para completar el dispositivo, agregamos una resistencia R con cursor C, de modo que se pueda variar la intensidad del campo entre cátodo y ánodo.

Es claro que, con estas modificaciones, los fotoelectrones inmediatamente de ser arrancados del ánodo metálico son atraídos por él, frenados por la diferencia de potencial adversa. ¿Llegarán ahora al cátodo para cerrar el circuito?



Si la velocidad con que fueron emitidos es suficiente, entonces llegarán; si no, no llegarán.

Supongamos que no llegan fotoelectrones al cátodo (eso lo sabremos porque en ese caso G señala la corriente nula): ello significa que los fotoelectrones salieron del ánodo con una velocidad v, es decir con una energía cinética $E_c = \frac{1}{2} m v^2$, pero el potencial adverso V los fue frenando hasta detenerlos y luego los electrones invirtieron su marcha y se precipitaron de regreso sobre el ánodo: la luz no les dio la energía cinética suficiente para realizar el trabajo $q V$ necesario para vencer el potencial adverso. Es como si tirásemos una piedra de peso P verticalmente hacia arriba, dándole una energía cinética $\frac{1}{2} m v^2$ menor que la energía potencial $P h$ que tendría a la altura n: no llega a esa altura y vuelve a tierra.

Mediante el cursor C disminuyamos V poco a poco, y veremos cómo se llega a un valor V_0 en que el galvanómetro comienza a señalar el paso de una corriente: los fotoelectrones comienzan a llegar al cátodo. Ello significa que cuando la diferencia de potencial es V_0, entonces sí la energía cinética que la luz provee a los fotoelectrones es suficiente (y les alcanza exactamente) para realizar el trabajo de vencer el potencial adverso:

$$\frac{1}{2} m v^2 = q V_0$$

Mediante esta fórmula podremos calcular v, pues conocemos m y q, y V_0 se lee en el voltímetro.

Quinto experimento. Tratemos de averiguar cómo influye *la iluminación de la superficie* (es decir, la energía de la luz) sobre *la velocidad de los fotoelectrones.*

Para aumentar o disminuir la iluminación se aumenta o disminuye la intensidad de la fuente de luz, o se la acerca o aleja de la superficie metálica (se recuerda que se trabaja con luz monocromática).

Antes de estudiar los valores obtenidos experimentalmente se podría razonar así: aumentar la iluminación significa aumentar la energía que recibe la superficie; entonces, la energía de los fotoelectrones debe aumentar. Por tanto, a mayor iluminación *debe corresponder* mayor velocidad de los fotoelectrones.

Pero las mediciones muestran que al variar la iluminación, la velocidad de los fotoelectrones... ¡no varía! Conclusión:

La velocidad de los fotoelectrones producidos por una luz monocromática es independiente de la iluminación.

Este curioso resultado es muy importante, pues revela que el mecanismo por el cual la luz arranca fotoelectrones necesita una explicación: al aumentar la *energía total* (iluminación) recibida por el metal emisor, no aumenta la *energía individual* de cada electrón emitido.

¿Es que entonces falla el principio de conservación de la energía? Si así fuera, simplemente temblarían los cimientos de toda la física... Pero no, no falla, pues lo que ocurre se puede explicar así: al aumentar la iluminación, aumenta el número de fotoelectrones arrancados, *sin que aumente la energía de cada uno.* Entonces ¿cada electrón se niega individualmente a recibir más energía que la que cada uno recibía antes de aumentar la iluminación?

Pues... parece que así es. ¿Y qué les impide recibir gradualmente cada vez más energía a medida que se va aumentando la iluminación? Lo veremos en seguida; por ahora destaquemos que los electrones *podrían* recibir la energía luminosa poco a poco, ir aumentándola hasta tener la suficiente para desprenderse del metal, y si recibiesen mucha, salir con mucha velocidad. *Podrían*, pero no se comportan así.

Lo que se observa experimentalmente es que al aumentar la iluminación la intensidad i de la corriente fotoeléctrica aumenta, o sea aumenta el número de fotoelectrones emitidos.

Una aplicación: el fotómetro. Una de las aplicaciones más difundidas del efecto fotoeléctrico son los fotómetros aplicados a las cámaras fotográficas, para saber si la iluminación de un objeto o paisaje es la necesaria para obtener una buena fotografía. El tema a fotografiar constituye la fuente luminosa; la aguja del fotómetro mide la corriente de electrones arrancados a la superficie sensible, y señala si la iluminación es o no la necesaria.

Sexto experimento. Si la iluminación no influye sobre la velocidad de los fotoelectrones, entonces... ¿cómo se hace para hacer variar esa velocidad? Ensayemos con luces de distintos colores (un color por vez), o sea de diferentes frecuencias f, y midamos la velocidad de los electrones producidos en cada caso. (Nos desentendemos de la iluminación, pues ésta no afecta las velocidades).

Efectuadas las mediciones, se encuentra que con frecuencias distintas las velocidades son distintas: hemos descubierto que *la velocidad de un fotoelectrón depende de la frecuencia de la luz.*

Pero... ¿cómo depende? ¿cuál es la ley?

Hagamos mediciones con muchas frecuencias, y observaremos que existe una frecuencia f_0 que es como un *umbral*, pues si se ilumina con luz de frecuencia menor que f_0 la luz es incapaz de arrancar electrones. Llamaremos a f_0, *frecuencia umbral.*

Si se repite la experiencia con diferentes superficies emisoras, se verifica que cada una tiene su frecuencia umbral propia. En resumen, a cada sustancia fotoeléctricamente sensible corresponde una frecuencia umbral f_0 tal que si se la ilumina con luz de frecuencia $f < f_0$, no emite fotoelectrones.

Ejemplos de umbrales (en números redondos):

sustancia	f_0 (en 1/s)
aluminio	$6 \cdot 10^{14}$
cobre	10
potasio	5
sodio	4

La clave está en la energía. El principio de conservación de la energía es una de las piedras fundamentales de la física. Si se quiere descubrir los mecanismos del efecto fotoeléctrico, convendría investigar lo que ocurre con la energía de la luz incidente y la energía de los fotoelectrones emitidos. Ya sabemos que sobre esta última la iluminación no influye, mientras que la frecuencia sí influye.

Si se comparan las energías W, W', W'', ..., de fotoelectrones arrancados a una sustancia de frecuencia umbral f_0, por luces de frecuencias f, f', f'', ..., se encuentra que

$$\frac{W}{f - f_0} = \frac{W'}{f' - f_0} = \frac{W''}{f'' - f_0} = \ldots =$$

$$= \text{constante} = h$$

Si se cambia de superficie emisora, cambia el umbral f_0 y cambian las energías de los fotoelectrones; pero lo extraordinario es que la constante no cambia, es una constante universal. Se la ha llamado *constante de Planck*, se la representa siempre con la letra h, y vale $6{,}62 \times 10^{-34}$ J s (Joule por segundo).

Resulta, entonces, que cada vez que es emitido un fotoelectrón de energía W, arrancado a una sustancia de frecuencia umbral f_0 por una luz de frecuencia f, se cumple siempre que

$$W = h\,(f - f_0)$$

EJEMPLO: *Calcular la energía de un electrón arrancado al aluminio por una luz de frecuencia* 8×10^{14} *l/s.*

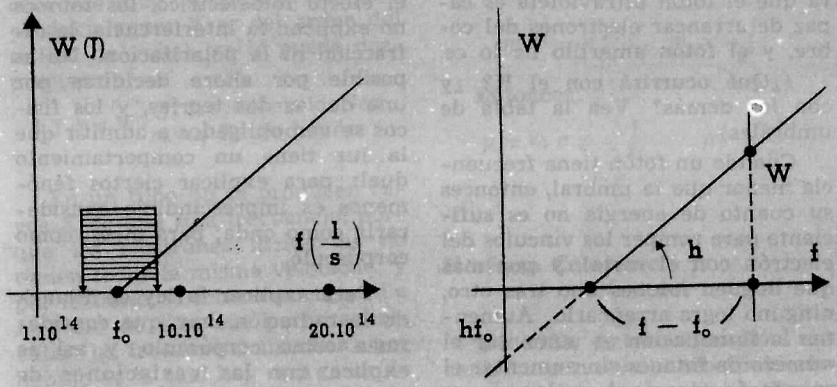
$$W = h\,(f - f_0) =$$
$$= 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot (8 - 6)\ 10^{14} \text{ l/s}$$
$$\cong 13 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

EJEMPLO: *Si luz de la misma frecuencia incide sobre potasio, ¿cuál es la energía de los fotoelectrones?*

El cálculo sólo se diferencia en la frecuencia umbral del potasio:

$$W = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot (8 - 5)\ 10^{14} \text{ l/s}$$
$$\cong 20 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

Representación gráfica. Si representamos en abscisas las frecuencias f en *l/seg* y en ordenadas las energías W en J, las mediciones obtenidas en el laboratorio conducen a la siguiente gráfica:



En la izquierda está señalado el espectro visible, aproximadamente en la zona rayada; a la derecha se destaca que la pendiente de la recta representa la constante de Planck.

Teoría de Einsten del efecto fotoeléctrico. Las leyes del efecto fotoeléctrico, descubiertas experimentalmente, produjeron una crisis. ¿Cómo puede ser, se preguntaban los físicos, que una intensísima luz roja no sea capaz de arrancar un electrón de una superficie de donde una tenue luz azul los arranca fácilmente? Fue entonces, alrededor de 1905, cuando Alberto Einstein propuso la siguiente explicación: la fórmula $W = h\,(f - f_0)$ puede escribirse

$$W - h\,f_0 = h\,f$$

Si se interpreta $h\,f_0$ como la energía que se empleó en romper el vínculo entre el fotoelectrón arrancado y la sustancia a la que pertenecía, entonces $h\,f$ resulta ser la energía entregada por la luz a ese fotoelectrón, individualmente.

El significado es asombroso: la luz no va entregando energía gradualmente al electrón, ni éste la va absorbiendo gradualmente hasta que le alcance para romper sus vínculos con el resto de átomos: el proceso se produce de golpe, de una sola vez, e intercambiando luz y electrón una sola cantidad de energía: $h\,f$. De ella, el electrón usa $h\,f_0$ para "liberarse", y el resto W le queda como energía cinética para alejarse.

Es decir que la luz que ilumina la superficie fotoeléctrica se comporta como un chorro de partículas, cada una con una energía determinada e igual para todas. Einstein llamó *fotones* a las partículas de luz, y *cuanto* a la energía de cada fotón.

EJEMPLO: *Si se ilumina con luz ultravioleta de* $f = 3 \cdot 10^{15}$ *l/seg, la energía de cada fotón es*

$$h\,f = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3 \cdot 10^{15}\ \text{l/s} \cong 20 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

En cambio, con luz amarilla de $f' = 5 \cdot 10^{14}$ *l/s:*

$$h\,f' = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 5 \cdot 10^{14}\ \text{l/s} \cong 3 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Compárese con las frecuencias umbrales que dimos antes, y se ve-

rá que el fotón ultravioleta es capaz de arrancar electrones del cobre, y el fotón amarillo no lo es

(¿Qué ocurrirá con el K? ¿y con los demás? Vea la tabla de umbrales).

Cuando un fotón tiene frecuencia menor que la umbral, entonces su cuanto de energía no es suficiente para romper los vínculos del electrón con el metal, y por más que lleguen fotones uno tras otro, ninguno logra arrancarlo. Aumentar la iluminación es aumentar el *número* de fotones sin aumentar el *cuanto de energía* de cada uno.

En resumen, y de acuerdo con la teoría de Einstein, las leyes del efecto fotoeléctrico pueden enunciarse así:

1. El número de fotoelectrones emitido en cada unidad de tiempo (intensidad de la corriente fotoeléctrica) es directamente proporcional al número de fotones incidentes (iluminación de la superficie).

2. La energía W de un fotoelectrón (o –lo que es equivalente– el cuadrado de su velocidad) es directamente proporcional a la diferencia entre la frecuencia f del fotón y la frecuencia umbral f_0:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 = h (f - f_0)$$

¿Qué es la luz?

Admitir que la luz es una lluvia de fotones es, en cierto modo, volver a la teoría corpuscular de Newton. Pero ello no significa despreciar la teoría ondulatoria, pues si bien ésta no puede explicar el efecto fotoeléctrico, los fotones no explican la interferencia, la difracción ni la polarización. No es posible por ahora decidirse por una de las dos teorías, y los físicos se ven obligados a admitir que la luz tiene un comportamiento dual: para explicar ciertos fenómenos es imprescindible considerarla como onda; para otros, como corpúsculo.

Para explicar la ley de Planck de la radiación, hay que considerarla como corpúsculo, y así se explica que las variaciones de energía emitida se realicen por saltos, pues una variación de energía no puede ser menor que el cuanto de un fotón.

Pero... ¿todos los intercambios de energía están regidos por la teoría de los cuantos? Así es, en efecto. Como dice Einstein, los cuantos constituyen una de las claves para descifrar el mundo físico. Más adelante veremos cómo Niels Bohr se sirvió precisamente de esta clave para dar la primera imagen coherente de cómo son los átomos.

El origen de los rayos X. La teoría de los cuantos explica el origen de los rayos X como el fenómeno inverso al efecto fotoeléctrico: *el bombardeo con electrones produce la emisión de una radiación.*

La ecuación de Einstein establece que

$$h f = W + h f_0$$

y como la energía del electrón incidente es e V, resulta:

$$h f = e V + h f_0$$

Como el término $h f_0$ es muy pequeño comparado con e V (re-

cuérdese que el potencial para producir rayos X es del orden del millón de volts), se lo puede despreciar:

$$h f = e V \quad \begin{matrix} (f, \text{ frecuencia de los} \\ \text{rayos X producidos}). \end{matrix}$$

En un tubo no se producen rayos X de una sola frecuencia, porque los electrones incidentes no tienen todos la misma velocidad, y por lo tanto, la misma energía. La fórmula de Einstein permite calcular la frecuencia máxima, por debajo de la cual hay una gama de frecuencias correspondiente a la gama de velocidades de los electrones. Además, un electrón sufre varios choques antes de detenerse; sólo en el caso de que en una sola colisión se detuviera, la radiación emitida sería la dada por aquella fórmula.

La masa y la cantidad de movimiento de un fotón. Pensemos en un fotón como una "partícula de luz" que se mueve con velocidad c, la velocidad de la luz, naturalmente. Como es una partícula, debe tener las características propias de las partículas, entre ellas la *masa* y la *cantidad de movimiento*: $p = m v$. La velocidad del fotón la conocemos: $v = c$, pero... ¿cuál es la masa m de un fotón?

Recurramos a la famosísima fórmula de Einstein que establece la equivalencia entre *masa* y *energía*:

$$E = m c^2$$

Por otra parte, de acuerdo con la teoría de Planck, la energía de un fotón es:

$$E = h f$$

de manera que:

$$m c^2 = h f \quad \therefore \quad m = \frac{h f}{c^2}$$

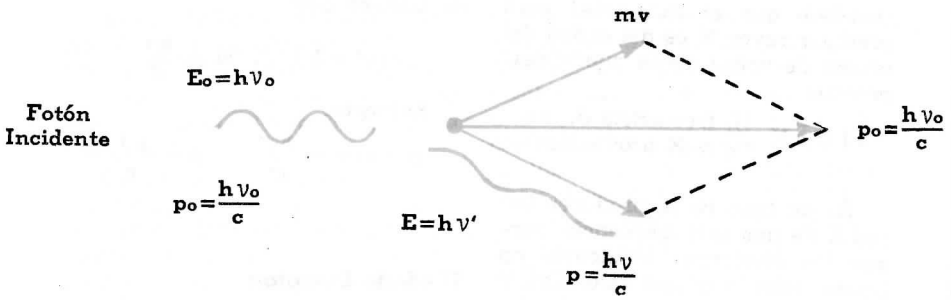
Entonces:

$$p = m v = \frac{h f}{c^2} \quad \therefore \quad p = \frac{h f}{c}$$

El efecto Compton

En 1923, Arturo Compton encontró una nueva prueba del comportamiento corpuscular de la luz al intercambiar energía con la materia. Compton estudiaba la difusión producida por un haz de rayos X al atravesar delgadas láminas de carbón, y como trabajaba con un haz monocromático, se sorprendió de la presencia, entre los rayos X difundidos, de frecuencias menores que la inicial.

Compton aplicó la teoría de los cuantos y lo explicó así: el fotón X incidente tiene una energía $W_0 = h \nu_0$, y una cantidad de movimiento $p_0 = \frac{h \nu_0}{c}$. En el choque contra un electrón que forma parte de los átomos de carbono, son válidos el principio de conservación de la energía y el principio de la conservación de la cantidad de movimiento. De modo que después del choque el fotón incidente sólo conserva una parte $h \nu$ de su energía incidente $h \nu_0$, pues el resto, $h \nu_0 - h \nu$, se lo ha cedido al electrón para ponerlo en movimiento dotándolo de energía cinética.



El efecto Compton. Después del choque, la radiación tiene longitud de onda más larga. Su energía ha disminuido por habérsela entregado a la partícula.

Como el cuanto del fotón ha disminuido y h es constante, quien disminuyó fue la frecuencia, de modo que

$$h\nu < h\nu_o \therefore \nu < \nu_o$$

La frecuencia de los fotones difundidos en una dirección dada puede ser prevista sabiendo la cantidad de movimiento, que es una magnitud vectorial (I, 172).

Compton desarrolló teóricamente el fenómeno, y lo comprobó experimentalmente con buen éxito; el efecto Compton es una nueva prueba de la naturaleza corpuscular de la luz.

Repetimos que los físicos se encuentran hoy ante la curiosa situación de tener que considerar la luz como onda en determinados fenómenos, y como corpúsculo en otros. Pero, como si faltara algo para curarnos de espanto, se ha comprobado que LOS ELECTRONES, Y MÁS AÚN, HASTA LAS MOLÉCULAS –que uno no podría imaginarse sino como corpúsculos– ... ¡A VECES SE COMPORTAN COMO ONDAS, PUES SE DIFRACTAN E INTERFIEREN!

EJEMPLO: *Calcular la cantidad de movimiento de un fotón rojo de frecuencia* $\nu = 4{,}4 \cdot 10^{14}$ 1/s.

$$p = \frac{h\nu}{c} =$$

$$= \frac{6{,}61 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 4{,}4 \cdot 10^{14}\ 1/\text{s}}{3 \cdot 10^{10}\ \text{cm/s}} =$$

$$= 9{,}68 \cdot 10^{-30}\ \frac{\text{Js}}{\text{cm}}$$

Reduciendo al sistema M K S, y recordando que $1\ \text{J} = 1\ \text{N} \cdot 1\ \text{m}$, y que $1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot 1\ \text{m/s}^2$:

$$p = 9{,}68 \cdot 10^{-28}\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{m}} =$$

$$= 9{,}68 \cdot 10^{-28}\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Max Planck

Max Planck (1858-1947).

Nació el 23 de abril de 1858 en Kiel, Alemania, en cuya universidad su padre era profesor de Derecho, y falleció el 3 de octubre de 1947, en Göttingen. A los 17 años ingresó en la Universidad de Münich; se graduó en la Universidad de Berlín, donde tuvo por maestros a Kirchhoff y a Helmholtz. Fue profesor en Kiel, luego en Berlín, donde sucedió a Kirchhoff, y en 1912 se le nombró secretario perpetuo de la Academia Prusiana de Ciencias. En 1918 recibió el Premio Nobel de Física, y en 1930 fue elegido presidente de la Sociedad Kaiser Guillermo para el desarrollo de la Ciencia.

En 1900 publicó la primera de sus investigaciones sobre el cuerpo negro.

Fue sabio y maestro de varias generaciones. Era profundamente respetado por el equilibrio de su juicio, la agudeza de sus análisis y su profunda honradez moral.

Problemas

1. Los fotoelectrones emitidos por un metal son frenados por un potencial de 3,64 V. Calcular la frecuencia frontera de ese metal.

R.: $8{,}8 \cdot 10^{14}$ 1/s

2. Calcular la velocidad máxima de los fotoelectrones emitidos por el metal del problema anterior, cuando se lo ilumina con luz cuya longitud de onda es 2 536 A.

R.: $6{,}6 \cdot 10^{7}$ cm/s

3. Calcular la energía cinética de los fotoelectrones del problema anterior.

R.: $19{,}5 \cdot 10^{-20}$ J

4. Calcular el cuanto de energía de un fotón de 3 390 A.

R.: $58{,}5 \cdot 19^{-20}$ J

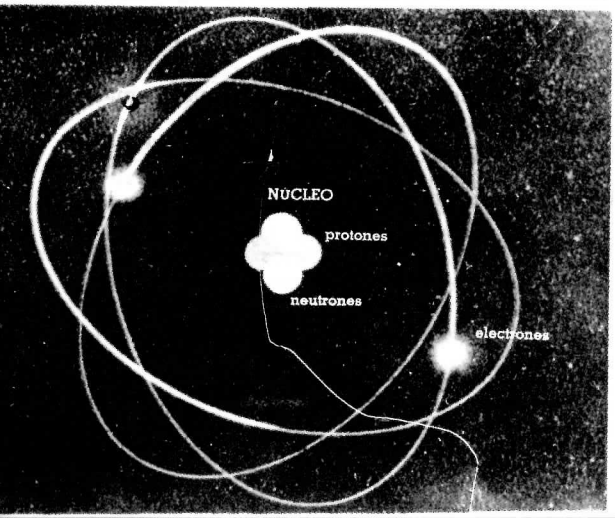
31 LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

La experiencia de Rutherford

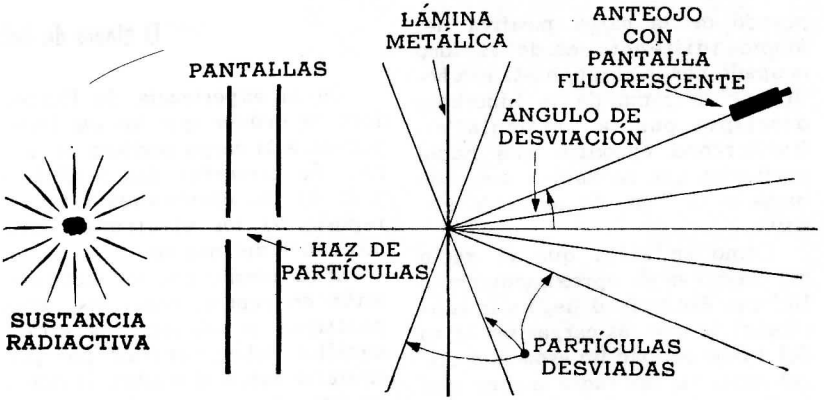
Hacia 1911 se admitía que los átomos estaban constituidos por cargas eléctricas positivas y negativas en cantidades iguales para que, como lo muestra la experiencia, sean exteriormente neutros. Pero no se tenía la menor idea de cómo podrían estar distribuidas esas cargas en el interior del átomo.

Rutherford pensó que si dirigía un haz de partículas α sobre una delgadísima lámina metálica, al atravesarla serían desviadas, sea por repulsión de las cargas positivas del átomo, sea por atracción de las negativas. Como el problema es análogo al de un cometa que pasa por el sistema planetario, Rutherford pensó que al conocer la trayectoria de las partículas podría obtener alguna información sobre las cargas interiores del átomo.

Colocó una sustancia radiactiva emisora de partículas α cerca de una lámina metálica delgadísima, separadas por dos pantallas con agujeros en sus centros, de modo que la dirección de incidencia quedara perfectamente determinada. Para observar la dirección en que eran desviadas al atravesar la lámina, colocó una pantalla fluorescente: en el punto donde incide cada partícula α, durante un brevísimo tiempo, se observa un puntito luminoso.



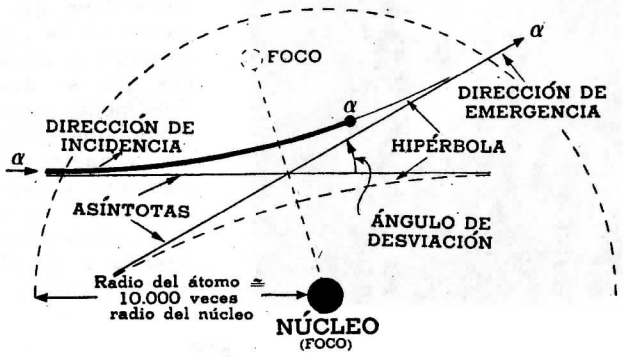
Estructura del átomo.



Esquema del dispositivo empleado en la experiencia de Rutherford.

Al realizar la experiencia, Rutherford comprobó que la mayor parte atravesaba la lámina sin desviarse, o con pequeñísimas desviaciones, pero que otras eran desviadas en ángulos muy grandes, incluso mayores que 90°. Esto último le llamó poderosamente la atención, y fue la clave del problema. En efecto: desviaciones tan grandes sólo pueden acontecer si la carga que produce la desviación de la partícula α tiene una masa muy grande comparada con la de ésta; luego, difícilmente puedan ser electrones los responsables de las desviaciones, pues éstos tienen una masa alrededor de 7 000 veces menor que la de una partícula α.

Por lo tanto, quien produce las desviaciones es la carga positiva del átomo; luego, la fuerza que actúa es de repulsión. Pero si una partícula se mueve mientras es constantemente repelida por otra, la trayectoria es una hipérbola, en uno de cuyos focos está la carga repulsiva. Como se conoce la dirección de incidencia (que es una de las asíntotas de la hipérbola) y la dirección después de la desviación (que es la otra asíntota), se puede determinar la mínima distancia a que cada partícula α ha



La trayectoria de la partícula desviada es una hipérbola, en uno de cuyos focos está el núcleo.

pasado de la carga positiva del átomo (distancia desde el foco ocupado por la carga, hasta el vértice de la rama de la hipérbola descripta por la partícula α). Rutherford encontró que había partículas que se habían acercado hasta a 10^{-12} cm de la carga positiva.

Como se sabía que el radio del átomo es de aproximadamente 10^{-8} cm, Rutherford llegó a la conclusión de que las cargas positivas del átomo ocupan un espacio reducidísimo, de un radio menor que 10^{-12} cm. Pero no formuló ninguna hipótesis de cómo están distribuidos los electrones.

De modo, pues, que si se imagina un átomo como una esfera, el radio de ésta es unas 10 000 veces mayor que el radio de la "esfera" ocupada por las cargas positivas. Una curiosa coincidencia: la distancia del Sol a Plutón (radio del sistema planetario) es unas 10 000 veces mayor que el radio del Sol.

Niels Bohr.

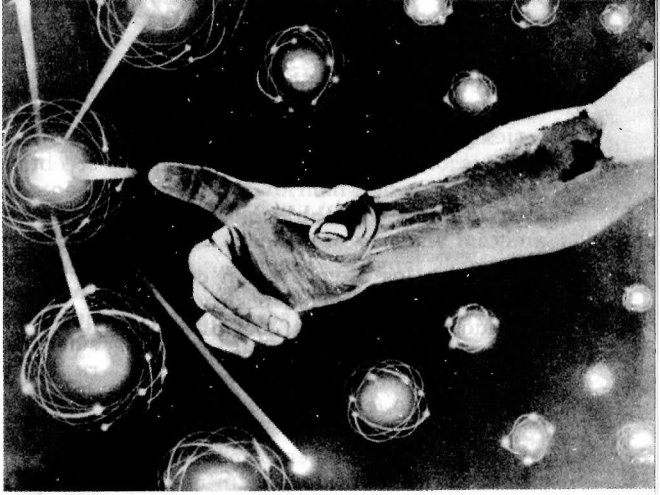
El átomo de Bohr

De la experiencia de Rutherford se deduce que los electrones rodean a la carga positiva del átomo. Se presentan dos posibilidades: *a)* los electrones están en reposo; *b)* los electrones giran alrededor del núcleo.

Si se admite que los electrones están en reposo, como las cargas positivas o núcleo, los atraen, aquéllos deben concluir por precipitarse sobre el núcleo, lo que es inaceptable porque el átomo no tendría las dimensiones que se conocen.

Si se admite, en cambio, que los electrones giran alrededor del núcleo, se presenta una objeción insalvable dentro de la física clásica: de acuerdo con la teoría electromagnética, una carga eléctrica sometida a una aceleración (y si los electrones giran, por lo menos están sometidos a la aceleración centrípeta) pierde energía en forma de radiación electromagnética. Pero si los electrones perdieran energía, su velocidad iría disminuyendo, y entonces describirían una espiral, para finalmente chocar contra el núcleo.

En el laboratorio de Rutherford trabajaba un joven físico danés, Niels Bohr, que se interesó vivamente en la experiencia de Rutherford, y estudió las conclusiones que se desprenden de ella. Finalmente propuso un modelo de átomo, que se conoce con su nombre, y que en esencia consiste en algo muy semejante a un sistema planetario: un núcleo central con las funciones del Sol, y electrones girando a su alrededor como si fueran planetas.



Investigación del átomo en la materia.

Bohr sabía que esta imagen está en contradicción con la física clásica, pero pensó que si bien la teoría electromagnética era correcta, podría ser inadecuada para describir lo que acontece en un recinto tan extremadamente diminuto como lo es un átomo.

Los postulados de Bohr

Bohr propuso los siguientes postulados:

1. Un átomo está constituido por una carga eléctrica positiva (núcleo) alrededor de la cual giran electrones, en número suficiente para compensar aquélla, describiendo circunferencias.

2. Cada electrón no puede moverse sobre una órbita cualquiera, sino solamente en aquéllas en las cuales su impulso de rotación es un múltiplo entero de $h/2\pi$ (h, la constante de Planck).

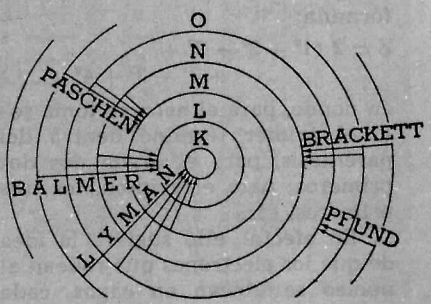
3. Cuando el electrón se mueve sobre una de sus órbitas, no irradia energía.

4. Un electrón puede saltar espontáneamente de una órbita a otra más cercana al núcleo. Al hacerlo, su energía disminuye en ΔW, y esa pérdida es emitida en forma de luz cuya frecuencia es

$$\nu = \frac{\Delta W}{h}$$

Estas frecuencias (una para cada par de órbitas) concuerdan con

Cómo se producen las series espectroscópicas del hidrógeno. Cuando un electrón salta desde una órbita dada hasta la más cercana al núcleo, las distintas radiaciones emitidas constituyen la serie de Lyman; si saltan hasta la segunda, emiten las de la serie de Balmer.



las observadas experimentalmente en las líneas espectrales de las series del hidrógeno.

Los átomos y la tabla periódica

Todos los átomos están constituidos por un núcleo positivo, rodeado por electrones. Las diferencias entre unos y otros radican en el número de electrones, o, lo que es lo mismo, en el número de cargas del núcleo. Así, el átomo de hidrógeno (el elemento más liviano) está constituido por un núcleo con una carga positiva (protón) y un electrón que gira a su alrededor. El elemento siguiente en la tabla periódica es el gas inerte helio: tiene un núcleo con dos cargas positivas, y dos electrones planetarios. El tercer elemento es el litio, con un núcleo de tres cargas positivas, y tres electrones planetarios. Y así siguiendo hasta completar todos los elementos químicos, incluso los transuranianos obtenidos artificialmente en estos últimos años.

Las propiedades químicas de un elemento dependen de sus electrones exteriores, y es muy significativo que el número de éstos en los gases inertes está dado por la fórmula:

$$Z = 2\,(1^2 + 2^2 + 2^2 + \\ + 3^2 + 3^2 + 4^2 + \ldots)$$

en donde, para el neón se toma sólo el primer término dentro del paréntesis, para el argón, los dos primeros; para el kriptón, los tres primeros, etc.

En efecto: ello sugiere la idea de que los electrones que rodean al núcleo se ubican en capas, cada una de las cuales puede contener hasta un cierto número de electrones, y no más. Cuando la capa se ha "saturado", el elemento que se obtiene es un gas inerte; el elemento que sigue a éste en la tabla, tiene los mismos electrones que aquél, más otro electrón ubicado en una nueva capa, exterior a las anteriores; en cambio el elemento que precede al gas inerte que consideramos, todavía tiene lugar para un electrón más en su capa exterior.

Es decir que en la primera capa electrónica que rodea al núcleo puede contener hasta $2 \cdot 1^2$ electrones. Si solamente hay uno, el átomo es de hidrógeno; si hay dos, es de helio. Y esa capa ya no puede contener más electrones; el tercer elemento, litio, tiene un tercer electrón en una nueva capa, que puede contener hasta $2 \cdot 2^2$ electrones. Esto ocurre en el neón, que tiene la primera y segunda capas electrónicas saturadas con 2 y 8 electrones, respectivamente. La tercera capa puede contener hasta $2 \cdot 2^2$ electrones, y ello ocurre en el argón; la cuarta capa puede contener $2 \cdot 3^2$ electrones, lo que se verifica en el kriptón; también 18 electrones puede tener la quinta capa, como en el xenón, mientras que la sexta puede contener hasta $2 \cdot 4^2$ electrones, como el radón o radio emanación.

El número 2 que figura como factor de la suma de la fórmula que da el número de electrones de un átomo inerte, sugiere una simetría en la distribución de las cargas, lo que trae como consecuencia que el campo eléctrico en las cercanías del átomo es sumamente débil. Ello explica además de su inercia química, que las moléculas de los gases inertes sean mo-

noatómicas, y que tengan una temperatura de condensación sumamente baja.

En contraste con los gases inertes, los elementos que están junto a ellos en la tabla son químicamente muy activos. Los que siguen a los gases inertes son metálicos y forman iones electrolíticos positivos, pues pierden fácilmente su electrón exterior; los que los preceden, no son conductores eléctricos, y forman iones negativos, pues reciben fácilmente un electrón. Además, la valencia máxima de un elemento es igual al número de lugares en que sigue, o precede, a un gas inerte.

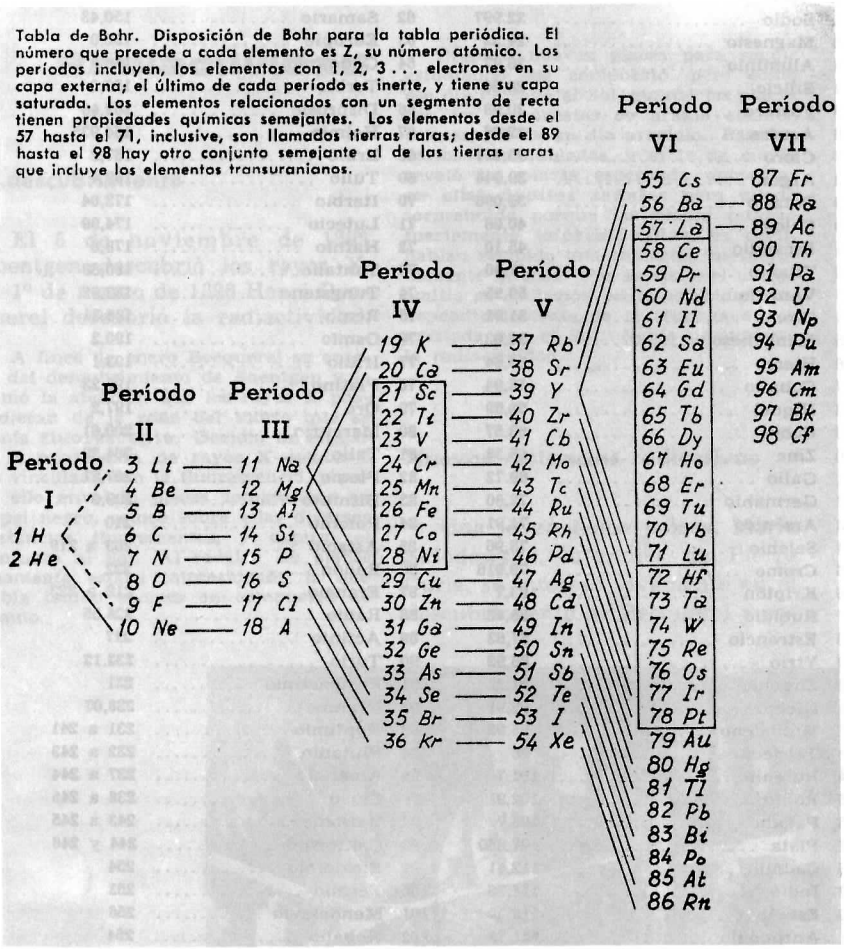


Tabla de Bohr. Disposición de Bohr para la tabla periódica. El número que precede a cada elemento es Z, su número atómico. Los períodos incluyen, los elementos con 1, 2, 3 . . . electrones en su capa externa; el último de cada período es inerte, y tiene su capa saturada. Los elementos relacionados con un segmento de recta tienen propiedades químicas semejantes. Los elementos desde el 57 hasta el 71, inclusive, son llamados tierras raras; desde el 89 hasta el 98 hay otro conjunto semejante al de las tierras raras que incluye los elementos transuranianos.

Números atómicos y masas atómicas

1	Hidrógeno	1,008
2	Helio	4,003
3	Litio	6,940
4	Berilio	9,02
5	Boro	10,82
6	Carbono	12,010
7	Nitrógeno	14,008
8	Oxígeno	16
9	Flúor	19,00
10	Neón	20,183
11	Sodio	22,997
12	Magnesio	24,32
13	Aluminio	26,97
14	Silicio	28,06
15	Fósforo	30,98
16	Azufre	32,06
17	Cloro	35,457
18	Argón	39,944
19	Potasio	39,096
20	Calcio	40,08
21	Escandio	45,10
22	Titanio	47,90
23	Vanadio	50,95
24	Cromo	51,01
25	Manganeso	54,93
26	Hierro	55,84
27	Cobalto	58,94
28	Níquel	58,69
29	Cobre	63,57
30	Zinc	65,38
31	Galio	69,72
32	Germanio	72,60
33	Arsénico	74,91
34	Selenio	78,96
35	Cromo	79,916
36	Kriptón	83,7
37	Rubidio	85,48
38	Estroncio	87,63
39	Ytrio	88,92
40	Zirconio	91,22
41	Niobio	92,91
42	Molibdeno	95,95
43	Tecnecio	98
44	Rutenio	101,7
45	Rodio	102,91
46	Paladio	106,7
47	Plata	107,880
48	Cadmio	112,41
49	Indio	114,76
50	Estaño	118,70
51	Antimonio	121,76
52	Telurio	127,61
53	Iodo	126,92
54	Xenón	131,3
55	Cesio	132,91
56	Bario	137,36
57	Lantano	138,92
58	Cerio	140,13
59	Praseodimio	140,92
60	Neodimio	144,27
61	Prometio	147
62	Samario	150,43
63	Europio	152,0
64	Gadolinio	156,9
65	Terbio	159,2
66	Disprosio	162,46
67	Holmio	164,935
68	Erbio	167,2
69	Tulio	169,4
70	Iterbio	173,04
71	Lutecio	174,99
72	Hafnio	178,6
73	Tantalio	180,88
74	Tungsteno	183,92
75	Renio	186,31
76	Osmio	190,2
77	Iridio	193,1
78	Platino	195,23
79	Oro	197,2
80	Mercurio	200,61
81	Talio	204,39
82	Plomo	207,21
83	Bismuto	209,0
84	Polonio	210
85	Astacio	203 a 219
86	Radón	222
87	Francio	212 a 223
88	Radio	226,05
89	Actinio	227
90	Torio	232,12
91	Protoactinio	231
92	Uranio	238,07
93	Neptunio	231 a 241
94	Plutonio	232 a 243
95	Americio	237 a 244
96	Curio	238 a 245
97	Berkelio	243 a 245
98	Californio	244 y 246
99	Einsteinio	254
100	Fermio	253
101	Mendelevio	256
102	Nobelio	254

32 LA ESTRUCTURA DEL NÚCLEO

Radiactividad

El descubrimiento

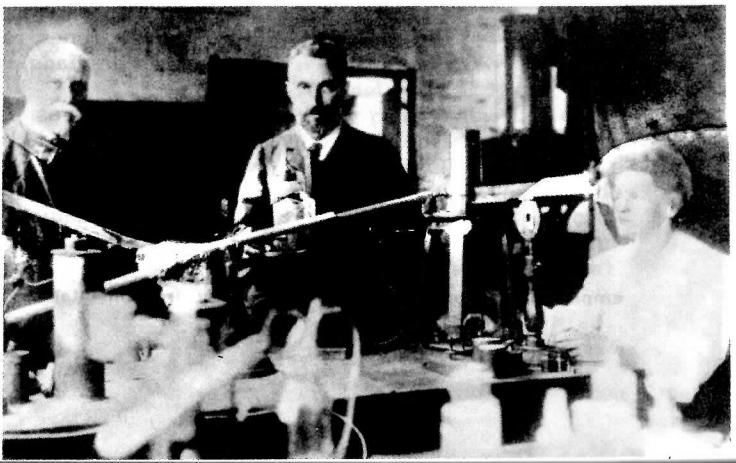
El 8 de noviembre de 1895 Roentgen descubrió los rayos X. El 1º de marzo de 1896 Henri Becquerel descubrió la radiactividad.

A fines de enero Becquerel se enteró del descubrimiento de Roentgen y le llamó la atención que los rayos X procedieran de la zona del vidrio que se ponía fluorescente. Decidió investigar si la producción de rayos X estaba o no vinculada con la fluorescencia, y para ello envolvió placas fotográficas en papel negro, colocó sobre ellas diversas sustancias fluorescentes, y expuso el conjunto al Sol. Al revelar las placas solamente estaba impresionada la que había tenido encima un compuesto de uranio.

Preparó nuevas placas para seguir estudiando ese compuesto, pero como ese día no salió el Sol, guardó las placas con los compuestos de uranio encima, a la espera de un día propicio. Pasaron varios días nublados, y el 1º de marzo reveló los placas esperando encontrar en ellas débiles señales pero quedó sorprendido porque las placas estaban fuertemente impresionadas, es decir, habían recibido una radiación inesperadamente intensa. Por lo visto, el uranio emitía su radiación en la oscuridad, independientemente de la fluorescencia excitada por el Sol. *Había descubierto la radiactividad.*

Nuevas sustancias radiactivas

Una joven física polaca, María Sklodowska, la mujer de Pierre Curie, se interesó vivamente en el descubrimiento de Becquerel y co-



Pierre y Eva Curie.

menzó a trabajar en el tema. Curie comprendió la importancia de esos trabajos, y abandonó los suyos para dedicarse a ellos.

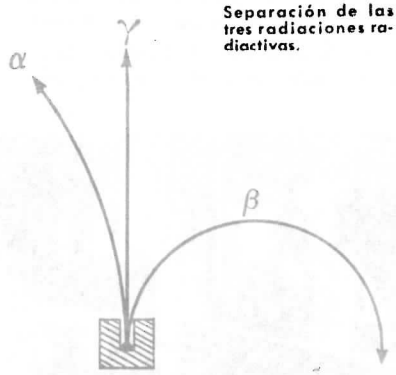
Después de mucho tiempo de realizar una tarea muy pesada y aburrida, en julio de 1898 descubrieron un nuevo elemento químico cuya radiactividad era 400 veces mayor que la del uranio.

En la comunicación que dirigieron a la Academia de Ciencias de París se lee: "Creemos, por tanto, que la sustancia que hemos extraído de la petchblenda contiene un metal que no se conocía hasta ahora, similar al bismuto en sus propiedades químicas. Si la existencia de este nuevo metal es confirmada, proponemos llamarlo *polonio*, por el país de origen de uno de nosotros".

En diciembre del mismo año, los Curie comunicaron el descubrimiento de una nueva sustancia radiactiva, de actividad aún mayor que la del polonio.

Su comunicación a la Academia dice: "Creemos... que esta sustancia a pesar de que en su mayor parte consiste en bario, contiene además un nuevo elemento al que debe su radiactividad, y que, además, en sus propiedades químicas está muy cerca del bario". "Monsieur Demarcay ha hallado en su espectro una línea que parece no estar presente en ningún elemento conocido." Cuando de dos muestras de la sustancia estudiada una presenta mayor radiactividad, esa misma muestra presenta más intensa una línea espectral desconocida, "...y esto, pensamos, es una poderosa razón para atribuirle (al nuevo elemento) la parte radiactiva de nuestra sustancia".

"Las varias razones que hemos presentado nos conducen a creer que la nueva sustancia radiactiva contiene un nuevo elemento, al cual proponemos darle el nombre de radio*."



Separación de las tres radiaciones radiactivas.

Más adelante se descubrieron nuevos elementos radiactivos, y en la actualidad se conocen alrededor de 40.

¿Qué son las radiaciones radiactivas?

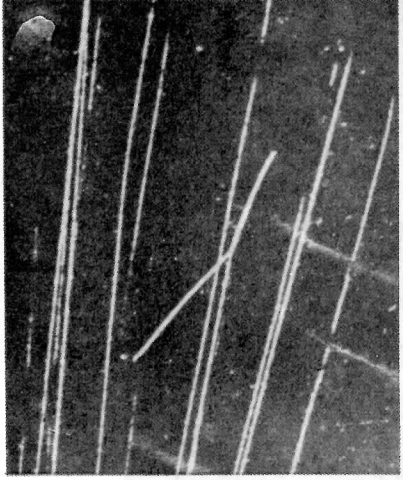
Al principio se creyó que los nuevos rayos eran rayos X, pero se vió que una parte de las radiaciones era desviada por un campo magnético, de modo que esa parte debía estar constituida por partículas eléctricas. ¿Serían electrones? Al medir su carga específica e/m, se comprobó que lo eran. Rutherford logró separar otra parte, pero de signo positivo; a estas radiaciones las llamó rayos α; a los electrones, rayos β, y a la parte no desviada, rayos γ.

Los RAYOS α, O PARTÍCULAS α. Son núcleos de helio, es decir, átomos de helio que han perdido sus dos electrones planetarios. Son, pues, partículas de carga doble que

* Llamamos la atención del lector sobre la sencillez y modestia del lenguaje empleado por los Curie para redactar su trascendental comunicación científica.

la del electrón, pero positiva. Su masa es aproximadamente 4 veces mayor que la del átomo de hidrógeno.

En el aire consiguen recorrer entre 3 y 7 cm antes de ser detenidos por choques, con los átomos que encuentran a su paso. A muchos de ellos los ionizan, es decir, les arrancan electrones. Sobre esos iones se condensan gotitas de agua que hacen visible su trayectoria en la cámara de Wilson. La densidad de ionización (pares de iones formados en cada unidad de longitud recorrida por la partícula α) crece a medida que la trayectoria se acerca a su fin, lo cual permite determinar el sentido del movimiento.



Trayectoria de partículas alfa; una de ellas ha chocado con un núcleo.

Los RAYOS β, o PARTÍCULAS β. Son electrones. Alcanzan a recorrer distancias mayores que las partículas α, pero como su masa es unas 7 000 veces menor que la de aquéllas, son fácilmente desviadas en sus choques, y su camino se hace sinuoso.

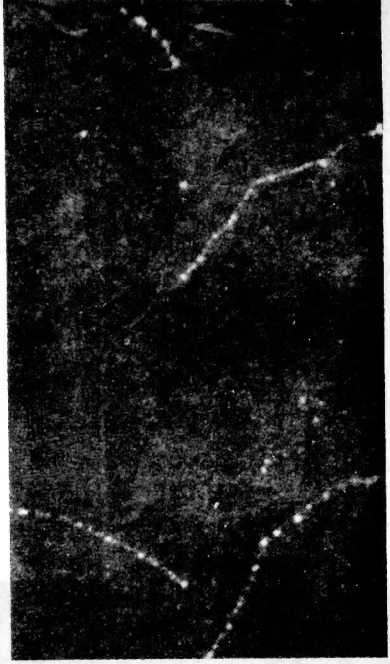
Tienen mayor poder penetrante que las α. Éstas son detenidas por una hoja de papel, o una lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor, mientras que las β atraviesan fácilmente el papel y, según sus energías, hasta unos milímetros de aluminio.

En cambio, el poder ionizante de una partícula β es unas 1 000 veces menor que el de una α de la misma energía.

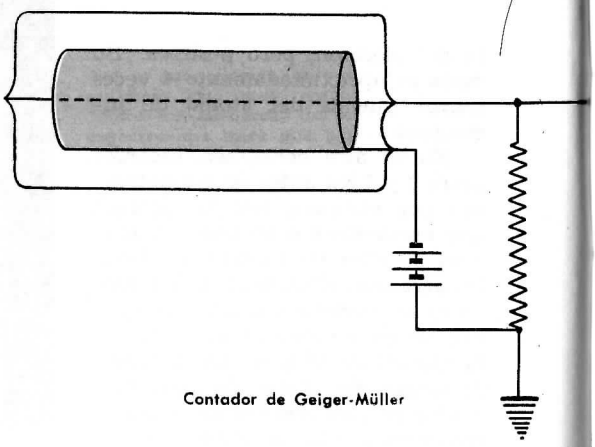
Electrones (rayos β) en la cámara de Wilson.

Los RAYOS γ. Son ondas electromagnéticas, como la luz visible o los rayos X, pero de menor longitud de onda. Ésta depende de la sustancia que los emita; varía entre unos 3 Å (la del torio C') y 0,05 Å (la del torio C''), que es la más corta y penetrante. Las energías de esos fotones γ son, respectivamente, 0,04 MeV y 2,6 MeV.

Los rayos γ más blandos (de longitud de onda grande) se confunden con los rayos X más duros (de longitud de onda corta).



Radiación gamma.

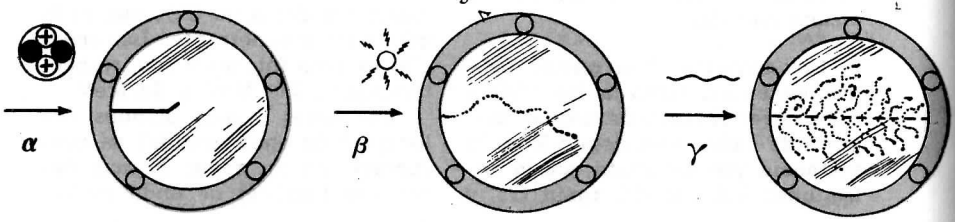


Contador de Geiger-Müller

Los rayos γ también se observan en la cámara de Wilson, pero en forma indirecta: cuando un fotón γ incide sobre un electrón de un átomo, lo hace saltar de su órbita, y ese fotoelectrón (pues ha sido producido por efecto fotoeléctrico) es el que va ionizando a su paso. De modo que cuando se dirige un haz de rayos γ a través de la cámara, se observan electrones. los orígenes de cuyas trayectorias revelan la zona por donde están pasando rayos γ.

DETECTOR DE RADIACIONES. El contador de Geiger y Müller consiste en un tubo cerrado en cuyo interior –donde hay gas a baja presión– se colocan dos electrodos: uno es un hilo metálico colocado a lo largo del eje del tubo, y el otro es una superficie cilíndrica que rodea al anterior. Entre ambos se establece una diferencia de potencial casi igual a la necesaria para que salte una chispa entre los dos electrodos. Cuando en el tubo penetra una partícula ionizante, se

Trazas en la cámara de nieblas dejadas por las tres distintas radiaciones



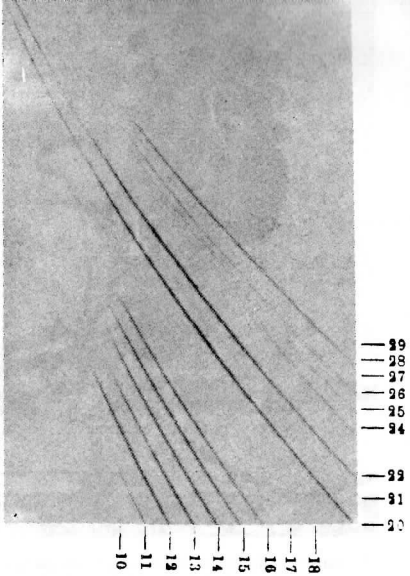
produce la chispa y la descarga se registra con un dispositivo adecuado. En algunos casos la descarga se amplifica y se transmite a un altoparlante, y cada vez que una partícula atraviesa el contador, se oye un ruido. En otros casos la descarga acciona un dispositivo mecánico que, como un taxímetro, va registrando el número de descargas producidas; en otros, se conecta con un osciloscopio de rayos catódicos, y cuando se produce una descarga se observa un salto en la pantalla.

Los rayos canales, o positivos

En 1886, E. Goldstein observó un haz luminoso detrás del cátodo de un tubo de rayos catódicos, que procedía de agujeros hechos en el cátodo, y los llamó *rayos canales*.

Wien logró demostrar que se desviaban en un campo magnético y en uno eléctrico, y el sentido de las desviaciones mostró que eran cargas positivas.

Para saber qué clase de partículas eran, J. J. Thomson midió su carga específica, e/m, y demostró que eran átomos ionizados. Calculó teóricamente, y demostró experimentalmente, que las partículas de una misma clase (es decir, de la misma carga específica) pero de velocidades diferentes, caen a lo largo de un mismo arco de parábola. Si dentro del tubo de rayos hay partículas con diferentes cargas específicas, cada clase produce una parábola distinta, como las de la fotografía.

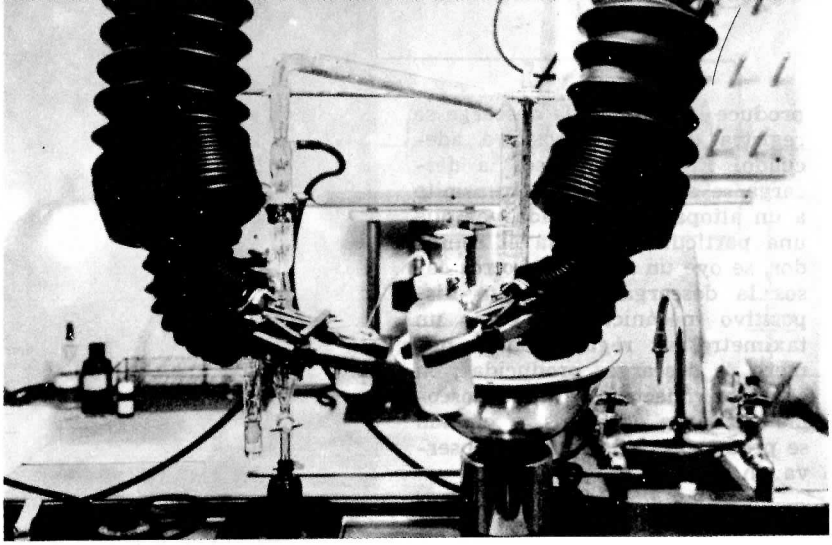


Parábolas de Thomson con las correspondientes masas atómicas.

Los isótopos

En varias de las fotografías Thomson observó una parábola que "no debía" aparecer: al lado de la correspondiente al neón, de masa atómica 20, había una que revelaba la presencia de iones de masa atómica 22... ¡pero en la tabla de Mendeleieff no había lugar para tales átomos! Finalmente se llegó a la conclusión de que eran, en verdad, iones de neón, pero de una nueva clase de neón, de masa atómica 22 y no 20.

Un nuevo hecho se presentaba ante los físicos: hasta ese momento se aceptaba que todos los átomos de un mismo elemento eran iguales, pero Thomson mostró que *un elemento químico es una mezcla de átomos*, todos con el mismo número de electrones planetarios pero con núcleos de diferente masa.



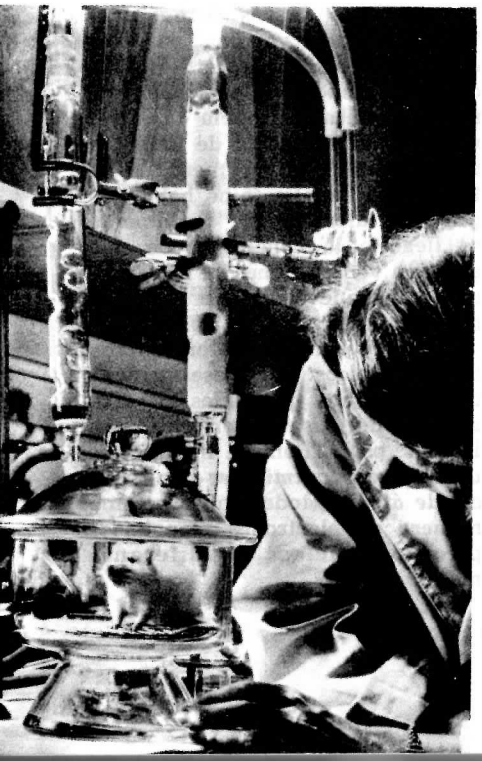
En esta "célula caliente" de la planta de los laboratorios Abbott (Estados Unidos de América, se preparan miles de pedidos de radioisótopos para médicos, hospitales y laboratorios de investigación médica. En ciertos casos se los usa para análisis y en otros para tratamiento específico de enfermedades.

Como los electrones planetarios son responsables de las propiedades químicas, esos átomos tienen las mismas, y ocupan el mismo lugar en la tabla de Mendeleieff. Por eso se los llama isótopos (*isos*, igual; *topos*, lugar).

DEFINICIÓN: *Son isótopos de un elemento químico los átomos que tienen el mismo número de electrones planetarios (número atómico) y distintas masas atómicas.*

El neón, por ejemplo, es una mezcla de 90 % del isótopo de masa 20 y 10 % de masa 22. La masa atómica, determinada químicamente, es 20,2; y, en efecto:

90 % de 20 =	18
10 % de 22 =	2,2
masa atómica de la mezcla:	20,2



Esta "caja de metabolismo" se usa para estudiar cómo son utilizados diversos compuestos por el organismo. En esta experiencia la rata recibe un alimento que contiene carbón radiactivo. El cuerpo metaboliza el alimento; en parte éste es oxidado y exhalado como dióxido de carbono, que asciende por la columna de la derecha, en donde reacciona y es recogido como carbonato de sodio. Se analizan las soluciones de carbonato de sodio y se mide el contenido de dióxido de carbono. De este modo los científicos pueden determinar qué cantidad del alimento suministrado es utilizado por el cuerpo en un período determinado.

La masa atómica química del cloro es 35,5; el cloro es una mezcla de 75 % de un isótopo de masa 35 y 25 % de otro de masa 37:

75 % de 35 =	26,25
25 % de 37 =	9,25
masa atómica de la mezcla:	35,5

Desintegración radiactiva espontánea

Los rayos α y β que emiten las sustancias radiactivas son partes de núcleos que se desintegran espontáneamente. Explotan en un momento dado, por causas desconocidas e incontrolables por el hombre, emitiendo una partícula α, o una β, o un fotón γ, y se transforman en núcleos distintos. Éstos, a su vez, pueden ser inestables, hasta llegar a núcleos estables.

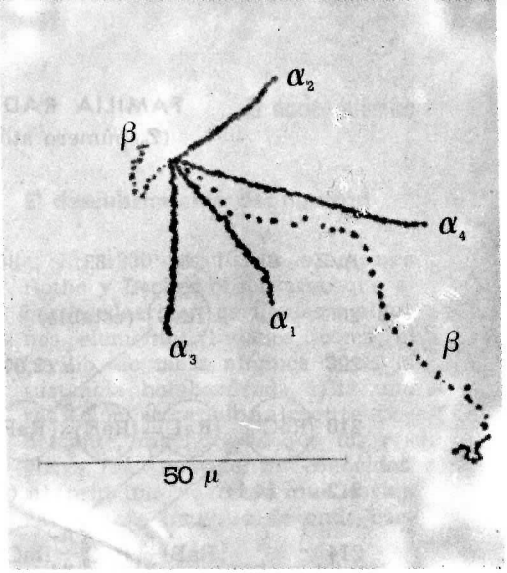
El gráfico de la página siguiente muestra las transformaciones de la familia radiactiva del uranio. Un átomo de uranio I, de masa atómica 238 y número atómico 92 emite una partícula α, cuya masa atómica es 4 y cuya carga es 2; el núcleo del resto tiene masa atómica 234 y número atómico 90. Se lo llama uranio X_1 y es un isótopo del torio ordinario (de masa atómica 232 y número atómico 90).

El uranio X_1 también es inestable: emite un electrón (radiación β) y se transforma en uranio X_2, de masa atómica 234 (pues la pérdida de un electrón no la afecta) y número atómico 91 (pues al perder un electrón la carga de su núcleo aumentó en 1 unidad positiva).

Una nueva emisión β transforma a este átomo en otro de la misma masa atómica pero de número atómico 92, es decir, isótopo del uranio: es el uranio X_2, también inestable. Y así sigue la serie de transformaciones hasta llegar al átomo de radio G, isótopo del plomo, que es estable.

Obsérvese que con cada emisión α la masa atómica disminuye en 4 unidades y el número atómico en 2, que son, respectivamente, la masa y la carga de la partícula α.

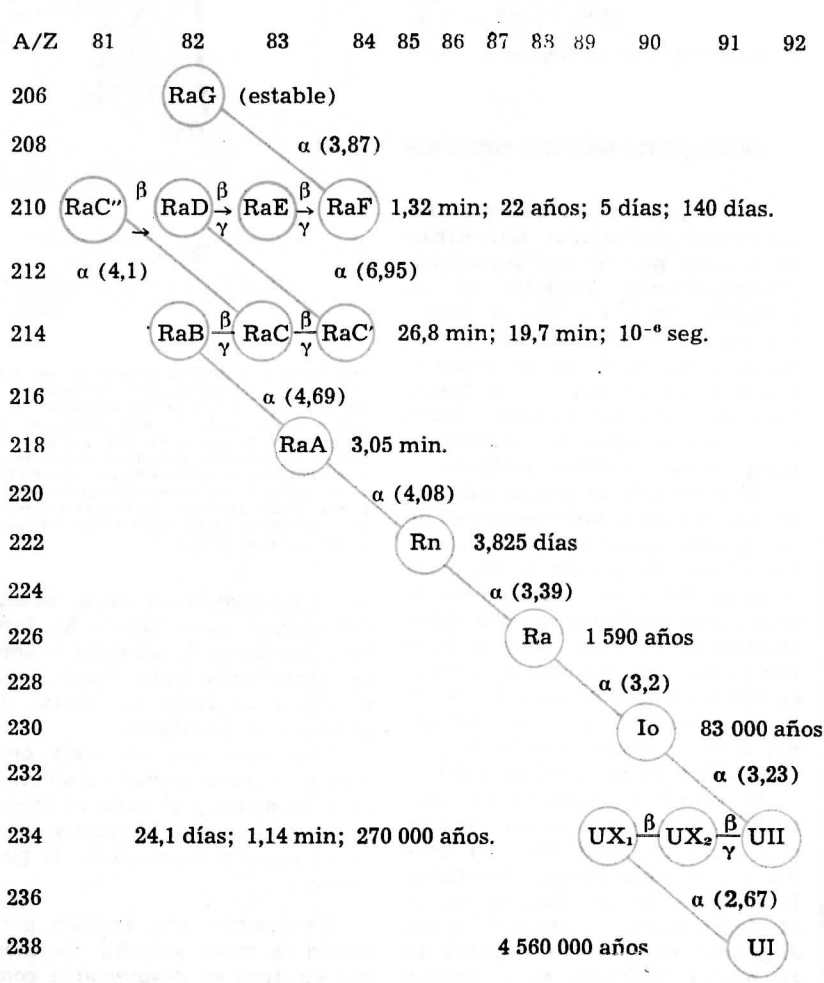
En cambio, una emisión β no afecta la masa atómica (la masa del electrón es despreciable comparada con la de una partícula α), pero aumenta en una unidad la carga eléctrica del núcleo, y, por tanto, el número atómico.



Una "estrella" radiactiva obtenida en una placa fotográfica y observada con microscopio. Un núcleo de uranio I emitió una partícula α_1 y se transmutó en uranio X_1; éste emitió una β y se transmutó en uranio X_2; éste, por otra emisión β, en uranio II; éste emitió una nueva α_2 y se transmutó en ionio; éste, por otra emisión α_3, en radio; y por último éste emitió otra α_4 y se transmutó en radón. La placa fue revelada antes que el núcleo de radón tuviera tiempo de transmutarse en radio A.

FAMILIA RADIACTIVA DEL URANIO

(Z, número atómico; A, masa atómica)



Masas atómicas

Los números entre paréntesis son las energías de las partículas α en Me V; los tiempos son las respectivas vidas medias.

Si se tiene una cierta masa de una sustancia radiactiva, esperando un tiempo suficiente, la mitad de los átomos que la componen se habrá desintegrado. *El tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los átomos de una masa cualquiera de una misma sustancia radiactiva, se llama vida media de esa sustancia.*

Las vidas medias de las distintas sustancias son muy diferentes; una de las mayores es la del torio, de $1{,}34 \cdot 10^{10}$ años; de las menores es la del torio C', que sólo es de alrededor de 10 billonésimos de segundo.

Conclusiones a que conduce la radiactividad

1. Los procesos radiactivos naturales escapan a todo control. Todas las variaciones de presión, temperatura y otros agentes físicos y químicos ni los retardan ni los aceleran.

2. Los átomos (por lo menos los radiactivos) no son indestructibles. Queda, pues, la esperanza de encontrar (como luego veremos, se encontró) algún medio de romperlos.

3. Los núcleos son, a su vez, estructuras complejas, pues emiten partículas α y β.

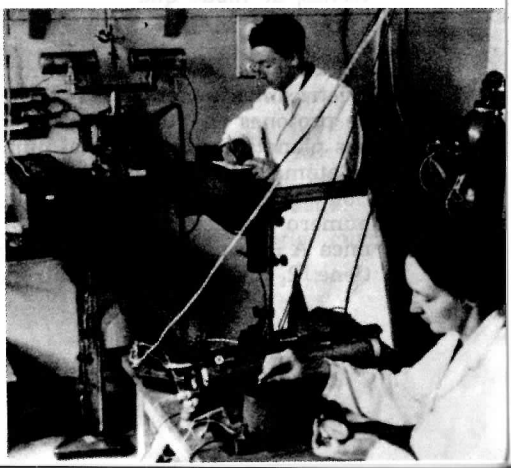
El descubrimiento del neutrón

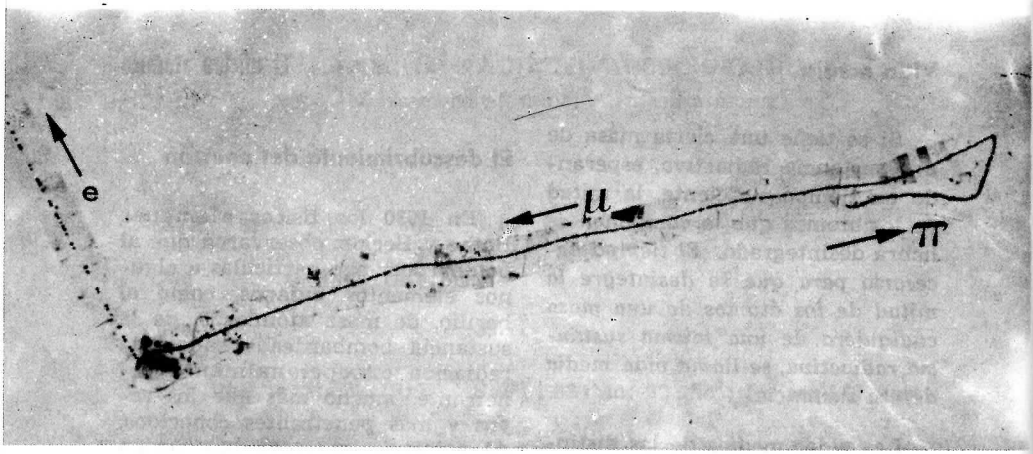
En 1930 los físicos alemanes Bothe y Becker observaron que al bombardear con partículas α algunos elementos livianos, como el berilio, de masa atómica 9, de la sustancia bombardeada salía una radiación excepcionalmente penetrante, mucho más que los rayos γ más penetrantes conocidos. Al principio se creyó que serían rayos γ de longitud de onda cortísima.

En 1932, Irene C. de Joliot (hija de Madame Curie) y Federico Joliot descubrieron que si en el camino de esa radiación se interpone parafina, o una sustancia *rica en hidrógeno*, la ionización producida se duplicaba. Pero siguieron admitiendo que eran fotones γ.

J. Chadwick, físico inglés, demostró que eran partículas de masa muy aproximadamente igual a

Irene Curie de Joliot y Federico Joliot trabajando en el laboratorio del Instituto del Radio, en París.





Mosaico fotográfico de un mesón y que se desintegra en un mesón y éste en un electrón. (Comisión Nacional de Energía Atómica.)

la del protón (núcleo del átomo de hidrógeno), pero sin carga eléctrica. Y las llamó *neutrones*.

Cómo es el núcleo

a) Los constituyentes. El núcleo está constituido solamente por protones y neutrones, en número tal que la suma de sus masas es igual a la masa atómica. Si A es la masa atómica de un elemento, sus núcleos tienen p protones y n neutrones, de modo que

$$A = p + n$$

Además, como el átomo es eléctricamente neutro, el número de protones es igual al de electrones planetarios, y ambos al número atómico Z del elemento en cuestión. Por ejemplo: el helio tiene número atómico $Z = 2$ y masa atómica $A = 4$; por lo tanto su núcleo tiene 2 protones y 2 neutrones. El uranio I tiene masa atómica $A = 238$ y número atómico $Z = 92$; por tanto, su núcleo tiene 92 protones y $n = A - p = 238 - 92 = 146$ neutrones.

b) El radio del núcleo. Experimentalmente se ha encontrado que el radio de un núcleo es tanto mayor cuanto mayor es su masa atómica. La ley experimental que vincula las dos magnitudes es

$$R = 1{,}4 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{A}$$

(en centímetros)

Para el hidrógeno ($A = 1$) es $R = 1{,}4 \cdot 10^{-13}$ cm; para el aluminio ($A = 27$) es $R = 1{,}4 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{27}$ cm $= 3 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-13}$ cm, es decir, radio triple que el del hidrógeno.

c) La densidad del núcleo. De acuerdo con la definición,

$$\delta = \frac{m}{V} \qquad (1)$$

La masa del núcleo es igual a la suma de las masas de los pro-

tones y neutrones, y como éstas son casi iguales, es igual a la masa del protón multiplicada por el número de partículas que hay en el núcleo, es decir, A:

$$m = m_p \cdot A \qquad (2)$$

Si admitimos que el núcleo es esférico,

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi\,(1{,}4 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{A})^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 2{,}7 \cdot 10^{-39} \cdot A \qquad (3)$$

De (1), (2) y (3)

$$\delta = \frac{m_p \cdot A}{\frac{4}{3}\pi \cdot 2{,}7 \cdot 10^{-39} A} = \frac{m_p}{\frac{4}{3}\pi \cdot 2{,}7} \cdot 10^{39}\left(\text{en } \frac{g}{cm^3}\right)$$

Por tanto, la densidad de la materia nuclear es independiente del elemento que se considere: *todos los núcleos de todos los átomos tienen la misma densidad.*

Se puede pensar, como símil, en la estructura de un cristal: si se consideran cristales cada vez mayores, mayor será la masa, pero también mayor será el volumen, de modo que la densidad es constante.

Como

$$m_p = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ g,$$

resulta,

$$\delta = 2{,}5 \cdot 10^{14}\ \frac{g}{cm^3} = 250.000.000\ \frac{\text{toneladas}}{cm^3}$$

En las estrellas enanas blancas se encuentran las densidades que más se aproximan a ésta, pero aún así sólo alcanzan a unas 40 ton/cm³, lo que es explicable, porque a pesar de que las partículas subatómicas están muy cercanas entre sí en la materia estelar, hay aún intersticios vacíos.

Nomenclatura nuclear. El núcleo de un elemento químico y sus isótopos se representan con el símbolo químico del elemento, precedido por un subíndice que señala el número atómico, y un superíndice que indica su masa atómica.

Ejemplos:

núcleo de hidrógeno común (protón): ${}_{1}^{1}H$

núcleo de helio: ${}_{2}^{4}He$

núcleo de litio: ${}_{3}^{6}Li$

núcleo de oxígeno: ${}_{8}^{16}O$

Los isótopos de un mismo elemento se distinguen porque tienen el mismo subíndice y diferente superíndice. Por ejemplo los del uranio son

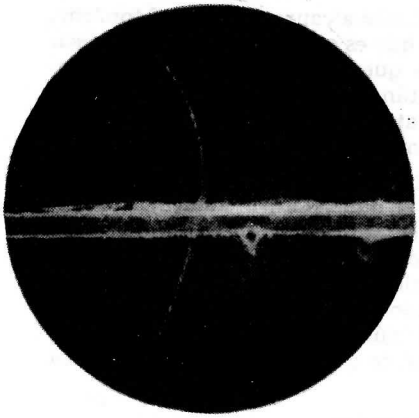
${}_{92}^{234}U$ (142 neutrones; vida media, $2{,}7 \cdot 10^5$ años; porcentaje, 0,006 %).

${}_{235}^{92}U$ (143 neutrones; vida media, $7{,}1 \cdot 10^8$ años; porcentaje, 0,71 %).

${}_{92}^{288}U$ (146 neutrones; vida media, $4{,}56 \cdot 10^9$ años; porcentaje, 99,28 %).

También son famosos los isótopos del hidrógeno, por la bomba de hidrógeno y el agua pesada:

el hidrógeno común, *protio*, cuyo núcleo es el protón: ${}_{1}^{1}H$;



La primera fotografía de un positrón.

el hidrógeno pesado, *deuterio*, cuyo núcleo es el deuterón: ${}^{2}_{1}H$;

el tercer isótopo, *tritio*, cuyo núcleo es el tritón: ${}^{1}_{3}H$.

Partículas elementales: materia y antimateria

Electrones, protones y neutrones no son las únicas partículas que intervienen en los procesos nucleares. En verdad, en los últimos años el número de las llamadas partículas elementales ha crecido con rapidez desconcertante, al extremo que la existencia de tantas partículas y sus relaciones entre sí constituye quizás un problema fundamental de la Física de hoy. En 1928, el físico inglés P. M. Dirac demostró teóricamente que las partículas deben existir por *pares*, de modo que a cada partícula debe corresponder una anti-partícula, de la misma masa pero con carga eléctrica opuesta. En 1932, Anderson comprobó por primera vez esta asombrosa predicción al descubrir el electrón positivo o *positrón*: tiene la misma masa que el electrón y también la misma carga eléctrica, pero positiva en lugar de negativa. Luego fueron descubiertos el antiprotón, etc. Hasta el presente se han descubierto 17 partículas y 17 antipartículas, es decir, 34 en total.

Dirac predijo también que si una partícula choca contra su antipartícula, ambas desaparecen, se aniquilan entre sí, produciendo energía. Esta trascendental predicción de Dirac ha sido cuidadosamente comprobada para todos los pares de partículas descubiertos hasta el presente.

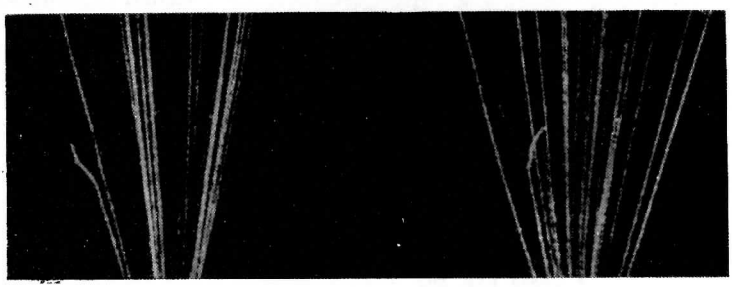
33 TRANSMUTACIONES Y RADIACTIVIDAD ARTIFICIALES

Las primeras transmutaciones

Transmutar sustancias en oro, el sueño de los alquimistas de la Edad Media, se hizo realidad, aunque modificado, en el siglo xx. La radiactividad mostró que la naturaleza, sin intervención del hombre, transmutaba unos elementos en otros. El sueño del sabio de comienzos del siglo xx debía ser transmutar él, a su voluntad, en el momento en que lo dispusiera. Y lo hizo realidad.

En 1919, Rutherford, el extraordinario físico neozelandés, bombardeaba las moléculas de distintos gases con partículas α para observar el comportamiento de unas y otras. En la cámara de Wilson observó partículas que, por la ionización específica y su carga específica, identificó como protones (núcleos de hidrógeno). Esto le llamó la atención, pues el tubo contenía solamente nitrógeno; pensó en un primer momento, que habría impurezas de hidrógeno, pero nuevas observaciones mostraron que algunas de las trayectorias de protones, en lugar de ir hacia adelante, en el sentido de los proyectiles α, formaban ángulo recto con ellos, y no pocas, hacia atrás. Rutherford interpretó esto como que los protones eran arrancados de núcleos de átomos de nitrógeno, y expresó lo acontecido con la ecuación

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O$$



Partículas α. Una de ellas chocó con un núcleo de nitrógeno; éste emitió un protón y se transmutó en oxígeno.

La partícula α se introduce en el núcleo del nitrógeno, y el conjunto inmediatamente emite un protón; el resto es un núcleo de número atómico 8 y un número de masa 17, isótopo del oxígeno.

Rutherford y sus colaboradores bombardearon sistemáticamente otros elementos químicos, para ver si la transmutación era un hecho aislado en el caso del nitrógeno, o bien posible con todos los elementos.

Las experiencias mostraron otras transmutaciones: el boro fue transformado en carbono, el sodio en magnesio, el aluminio en silicio. Pero se notó algo llamativo: la proporción de átomos transmutados era cada vez menor a medida que se operaba con masas atómicas crecientes, y fue imposible lograr transmutaciones más allá del argón. Los núcleos pesados eran invulnerables para las partículas α producidas naturalmente, porque la carga positiva de aquéllos impedía su penetración. El problema era, pues, fabricar "cañones artificiales" que dotaran a los proyectiles de velocidades mayores. Éste fue el nuevo camino, iniciado por Cockroft, discípulo de Rutherford, y perfeccionado luego por Van de Graff y Lawrence.

Los aceleradores de partículas

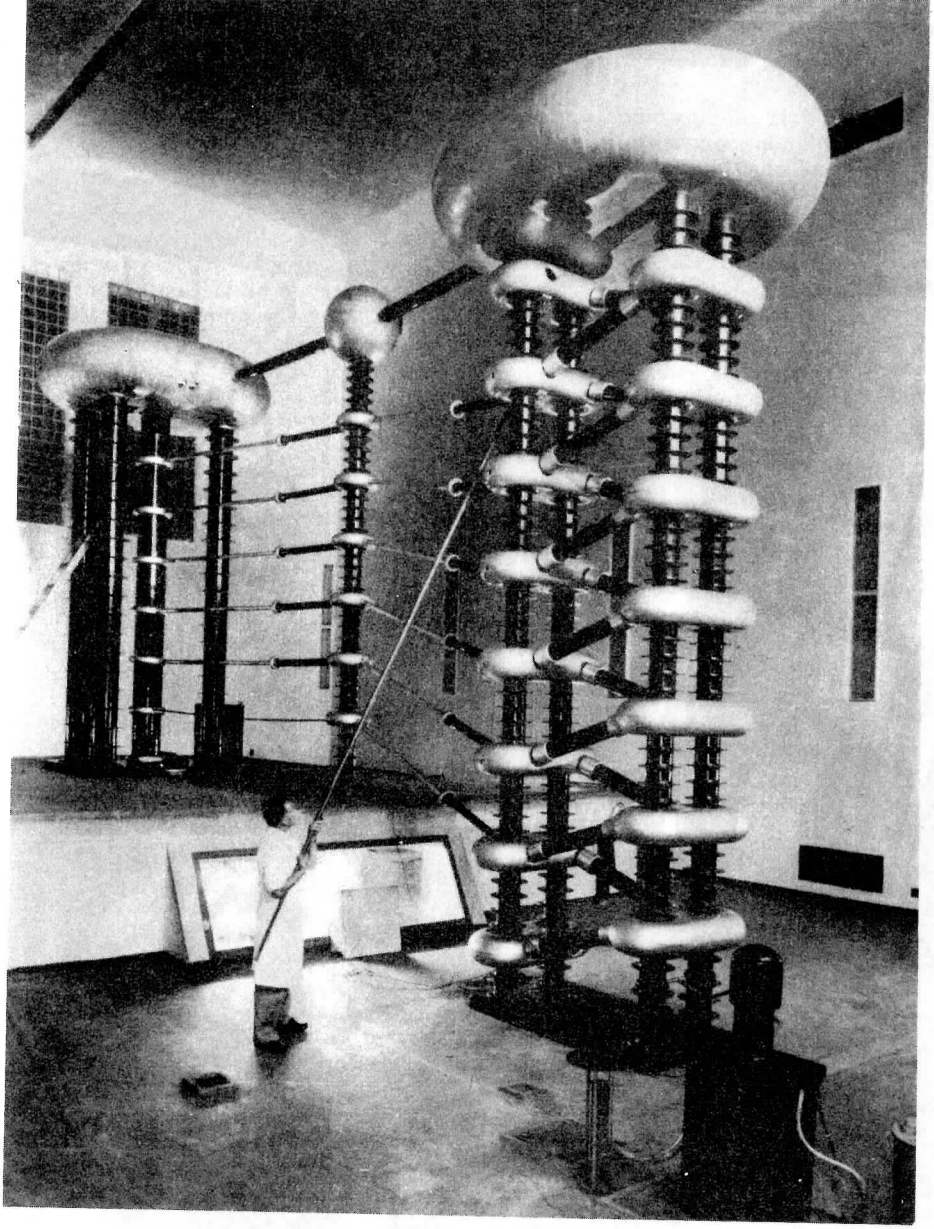
La máquina de Van de Graff

En otro lugar* hemos descripto el fundamento de la máquina electrostática de Van de Graff, con la que se obtienen diferencias de potencial de unos 2 millones de volts en pocos minutos de funcionamiento. Una partícula cargada que se mueve entre esa diferencia de potencial V adquirirá al final de su trayectoria una energía $q\,V$, siendo q su carga. Si es una partícula α, como su carga es la de dos electrones, llegará al blanco con una energía de 4 Me V. Si es un protón, su energía es la mitad, por ser la mitad su carga.

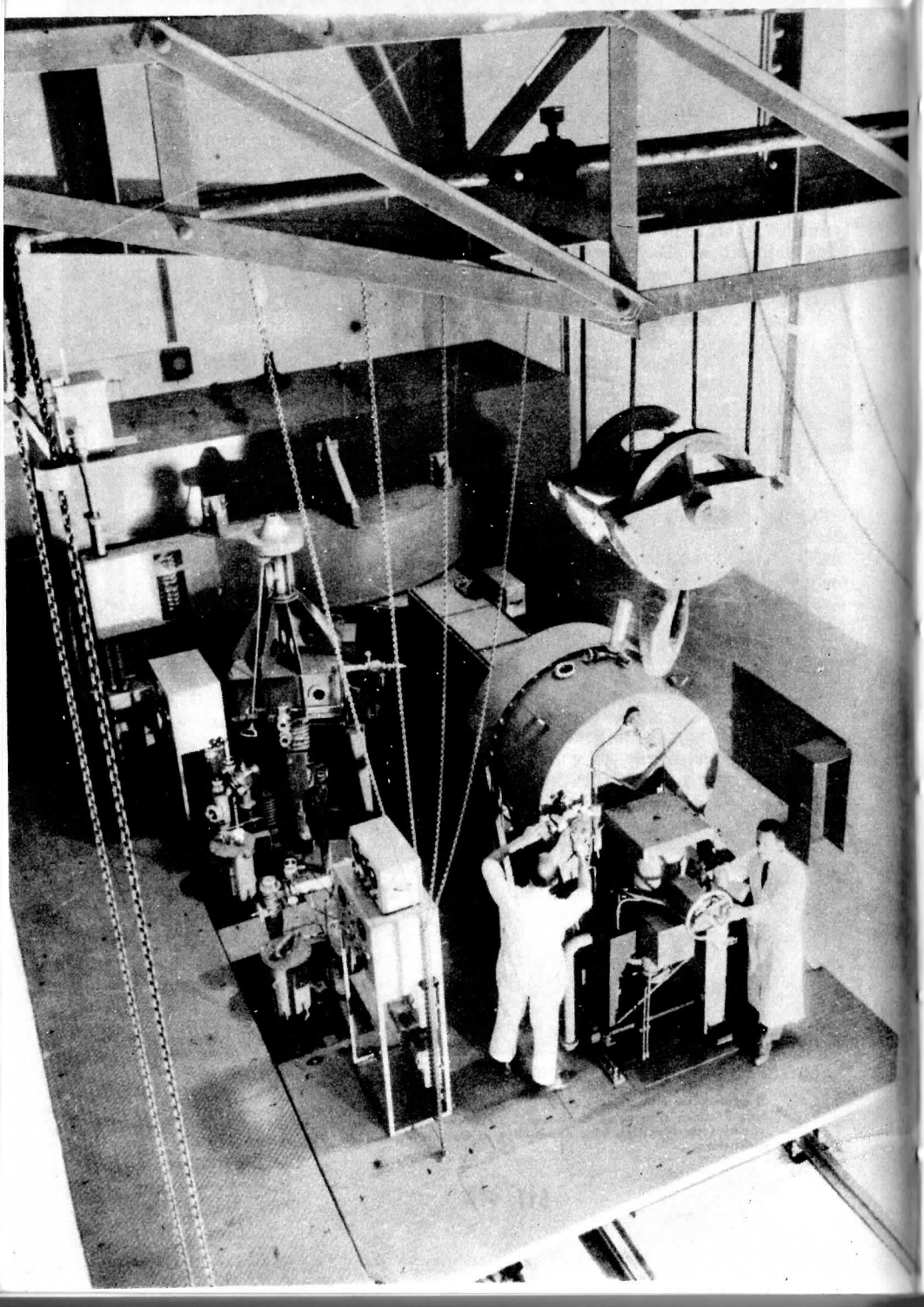
El ciclotrón

En 1929, Ernest Lawrence, del Instituto Tecnológico de California, creó un acelerador basándose en una idea distinta de la de Van de Graff. En el esquema (pág. 519), P es el punto donde se generan las partículas que serán aceleradas. No se dibujaron los polos de un electroimán (uno estaría por encima del papel, y el otro por debajo) que crea un campo magnético perpendicular al plano de la figura. D_1 y D_2 representan dos electrodos entre los cuales hay una diferencia de potencial de unos 10 000 V. Los norteamericanos los llaman "dees" por su forma parecida con la letra "D", y como no tienen otra traducción al castellano los llamaremos "las *des*", que es el nombre corriente. Si se las juntara, las *des* formarían un recipiente parecido a una lata cilíndrica de dulce de batata. En su interior se hace el vacío, hasta que la presión sea de unos milésimos de mm de Hg, y luego se introdu-

* Véase pág. 209.



El acelerador en cascadas de la Comisión Nacional de la Energía Atómica argentina. Produce partículas de hasta 1.2 MeV. Con él se han realizado importantes trabajos de investigación, entre ellos el descubrimiento de cinco nuevos isótopos radiactivos.



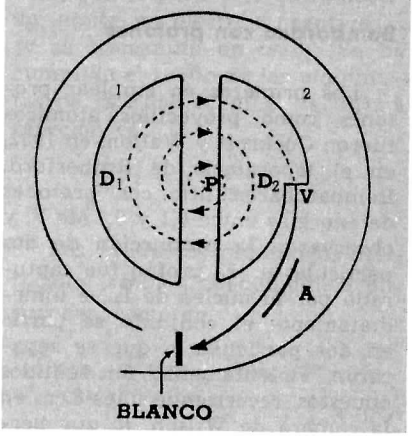
ce el gas que producirá los proyectiles (por ejemplo, deuterio, si los proyectiles que se desean obtener son deuterones; hidrógeno común, si se quiere trabajar con protones). Un filamento incandescente colocado encima de las *des* produce un haz de electrones; esos electrones bombardean los átomos de deuterio o de hidrógeno por ejemplo, y a algunos les arranca el electrón planetario: ya se tiene el deuterón o el protón listo para ser acelerado. La diferencia de potencial entre las *des* arrastra a la partícula hacia la *de* que en ese momento es negativa, por ejemplo la D_2, dándole una energía $q\,V$ (q, carga de la partícula; V, diferencia de potencial entre las *des*). Dentro de cada *de* el campo eléctrico es nulo, de modo que ahí la partícula no es acelerada; pero como está actuando el campo magnético, la trayectoria de la partícula es una semicircunferencia. Emerge, pues, de la D_2 con la misma energía $q\,V$ con que entró a ella. Pero al entrar al espacio entre las *des*, la polaridad de éstas ha cambiado, y ahora es D_1 la negativa. El campo eléctrico que hay entre ellas la acelera nuevamente, aumentando su energía otra vez en $q\,V$, de modo que la partícula entra en D_1 con una energía $2\,q\,V$; como ahora la velocidad es mayor, en D_1 describe una circunferencia de mayor radio que en D_2. Y así se repite el ciclo, incrementándose la energía de la partícula en $q\,V$ cada vez que pasa por el espacio entre las *des*, y describiendo una trayectoria en espiral. Finalmente, sale por la ventana V, y es atraída por una chapa deflectora A para hacerla dar sobre el blanco.

Para alternar la polaridad de las *des* se las conecta a una fuente de alta frecuencia, del tipo de los radiotelefónicos, lo que permite efectuar los cambios con la rapidez necesaria para seguir el movimiento de las partículas: unos 10 000 000 de veces por segundo.

El sincro-ciclotrón

Para evitar las dificultades que surgen en la aceleración de partículas en un ciclotrón hasta una energía muy elevada, se deja que disminuya la frecuencia del campo alterno de alta frecuencia a

Esquema de un ciclotrón



El ciclotrón de la Comisión Nacional de la Energía Atómica, inaugurado en diciembre de 1954, con el cual se han descubierto dos nuevos isótopos radiactivos.

medida que aumenta la energía de las partículas. De este modo no se retrasan y continúan atravesando sincrónicamente con el campo alterno el espacio entre electrodos. En esto se basa el sincro-ciclotrón. La Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina posee un sincro-ciclotrón con el que se han realizado muy importantes trabajos de investigación científica; el de más trascendencia es, sin duda, el que condujo al descubrimiento, en 1963, de una nueva partícula: el *diprotón*.

OTROS ACELERADORES. En los últimos años se han desarrollado nuevos y cada vez más poderosos aceleradores de partículas. El más grande y potente se encuentra actualmente en la Unión Soviética, pero en Estados Unidos de América se construye uno nuevo de 6 km de largo a un costo de 120 millones de dólares.

Los proyectiles atómicos

Bombardeo con protones

Los primeros en emplear protones como proyectiles atómicos fueron Cockroft y Walton, en 1932, en el laboratorio de Rutherford. Bombardearon litio con protones de energías entre 0,1 y 0,7 Me V, y observaron la producción de dos partículas α. El protón fue capturado por el núcleo de Li, e inmediatamente el conjunto se partió en dos partículas α que se separaron violentamente en sentidos opuestos, recorriendo unos 8 cm en la cámara de Wilson, lo que permite calcular en 8,6 Me V la energía de cada una. La reacción nuclear es

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Posteriormente se han realizado muchísimas transmutaciones mediante el bombardeo con protones.

Bombardeo con deuterones

El bombardeo de $^{7}_{3}\mathrm{Li}$ con deuterones puede producir dos reacciones distintas:

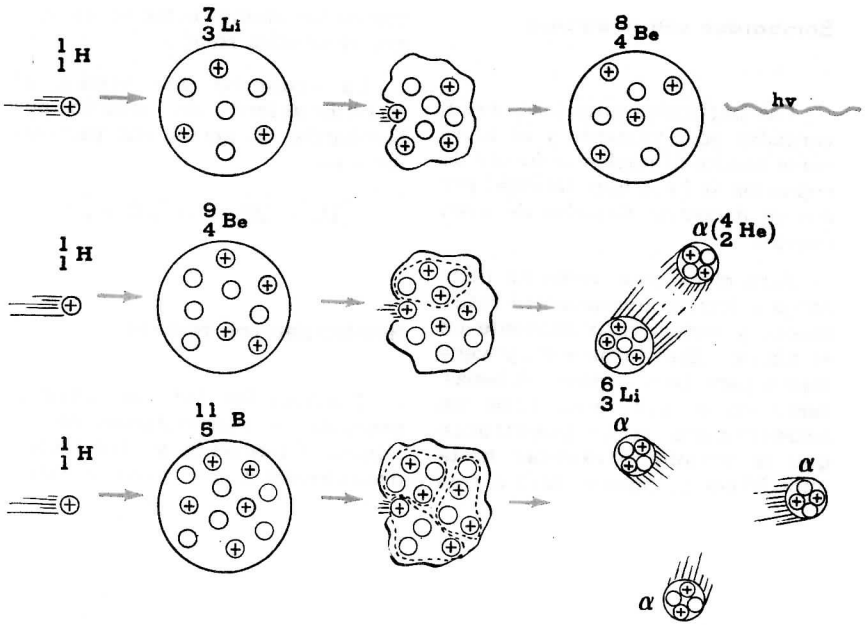
$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow 2\ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n$$

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{8}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}:$$

y a continuación:

$$^{8}_{3}\mathrm{Li} \longrightarrow {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + e$$

Como se ve, cuando el núcleo Li captura a un deuterón, puede desintegrarse en dos partículas α y un neutrón, o bien formar el isótopo $^{8}_{3}\mathrm{Li}$, que emite un electrón negativo y se transforma en el isótopo del berilio $^{8}_{4}\mathrm{Be}$. Esta última reacción muestra dos hechos importantes: 1) puesto que el núcleo $^{8}_{3}\mathrm{Li}$ emite electrones, o sea rayos β, es radiactivo, de modo que se ha "fabricado" artificialmente una sustancia radiactiva; 2) puesto que en el núcleo sólo hay protones y neutrones, ¿de dónde salió ese electrón expulsado por el núcleo? O, ¿cómo es que estaba allí? Véase nuevamente la pág. 209.



El núcleo $^{8}_{4}Be$ formado en la primera reacción es inestable, y en un tiempo brevísimo se desintegra en dos núcleos $^{4}_{2}He$.

Otro hecho interesante ocurre al bombardear agua pesada (formada con deuterio). Pueden acontecer por lo menos estos dos casos:

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H$$

En el primer caso se obtiene un isótopo del helio y un neutrón; en el segundo, un protón y un tritón. Éste es radiactivo.

Otro ejemplo interesante es

$$^{196}_{78}Pt + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{197}_{78}Pt + {}^{1}_{1}H$$

se obtiene un protón y un isótopo del platino; pero éste es radiactivo, emite un electrón negativo... ¡y se transmuta en ORO! ¡Se ha cumplido el sueño de los alquimistas de la Edad Media! La última reacción es

$$^{197}_{78}Pt \longrightarrow {}^{197}_{79}Au + e^{-}$$

Los productos radiactivos artificiales también pueden emitir positrones, como en

$$^{40}_{20}Ca + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{38}_{19}K + {}^{4}_{2}He$$

$$^{38}_{19}K \longrightarrow {}^{38}_{18}A + e$$

Bombardeo con neutrones

Las partículas anteriores están cargadas positivamente y al acercarse mucho al núcleo la fuerza de repulsión se hace muy intensa; por eso es necesario dotarlas de gran energía.

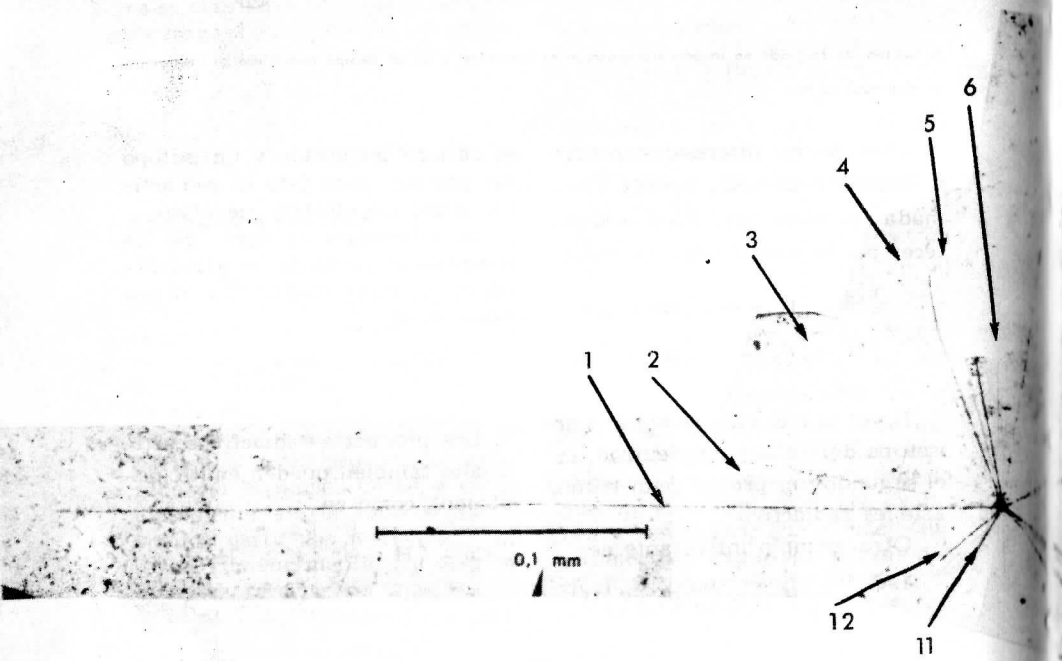
Pero el neutrón, como no tiene carga eléctrica no encuentra resistencia, y entra tranquilamente en el núcleo. Esto lo hace muy ventajoso para bombardeos. Además, como no es desviado, tiene un extraordinario poder penetrante que le permite atravesar hasta unos 30 cm de plomo: pasa a través de los átomos como un cometa por el sistema solar.

La ecuación que originó el descubrimiento del neutrón, por bombardeo de berilio con partículas α es

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}n$$

Bombardeo con fotones

También los fotones pueden producir la transmutación de un núcleo. Chadwick y Goldhaber descubrieron que rayos emana-



dos por torio C", cuya energía es $h\nu = 2{,}62$ MeV desintegran el deuterón según la siguiente ecuación:

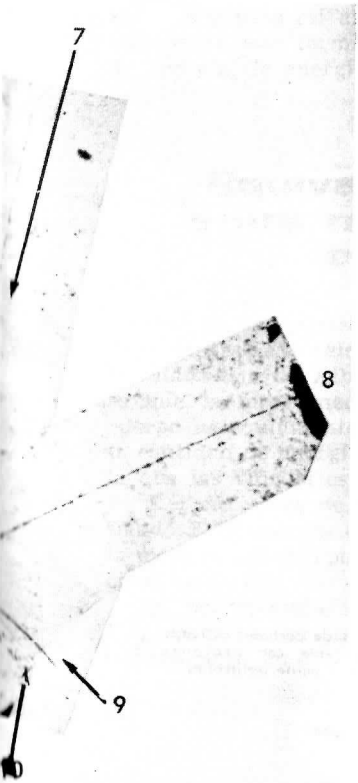
$$h\nu + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{1}_{0}n$$

Este fenómeno se llama *foto-desintegración.*

Los rayos cósmicos

De los espacios siderales llega constantemente a la Tierra una radiación todavía no muy bien conocida, y a la que genéricamente se la llama *radiación cósmica,* o *rayos cósmicos.*

Se sabe que la mayor parte de esa radiación es absorbida en las altas capas de la atmósfera, y que lo que llega a la superficie terrestre es principalmente una *radiación secundaria.* No se sabe qué es la *radiación primaria,* pero presumiblemente consiste en una lluvia de protones. Al entrar en la atmósfera, éstos chocan con los átomos que encuentran a su paso, y originan así la radiación secundaria, que consiste en electrones, protones, y sobre todo en mesones. De éstos hay una gran variedad, y no se los conoce bien aún, tanto que la diversidad de masas obser-



En la figura puede verse la desintegración nuclear producida en una placa fotográfica especial expuesta durante 6 semanas en la terraza del Observatorio Astronómico de Córdoba. La explosión fue producida por alguna de las partículas que constituyen la llamada "radiación cósmica", al chocar con el núcleo de un átomo. Los fragmentos producen en la emulsión un efecto análogo al de la luz, y revelada la placa sus trayectorias se hacen visibles, bajo el microscopio, como una sucesión más o menos densa de granos de plata. La mayor o menor densidad de grano de la trayectoria da una idea de la carga eléctrica del fragmento. Los granos de halogenuro de plata tienen un diámetro de alrededor de 0,001 mm; de ahí que el ancho de la trayectoria de un fragmento nuclear o de un "rayo" cósmico tenga ese valor y sea necesario el microscopio para analizar la placa expuesta a la radiación cósmica. Las trayectorias no están todas en un mismo plano, y a ello se debe la imposibilidad de fotografiar de una sola vez todo el proceso; para obviar ese inconveniente se toman fotomicrografías sucesivas a lo largo de cada trayectoria, enfocando cada vez un tramo distinto de la misma. Con estas fotografías parciales se arma después la total, pegándolas de modo que coincidan exactamente el extremo de una fotomicrografía con el principio de la siguiente, hasta formar todo el registro. Es fácil ver en la figura cada una de las fotomicrografías y, con ayuda de la escala adjunta, apreciar las dimensiones del acontecimiento y la ampliación que la fotografía representa. La mayoría de los fragmentos no se ha detenido en la emulsión y han salido al aire que rodea la placa o al vidrio sostén de la emulsión. Dado el número de fragmentos se puede decir en este caso, que se trata de la desintegración de un núcleo de bromo o de plata, que son los elementos más pesados presentes en la emulsión. 1, 5, 6, 8 y 9 son partículas α; 2, 7 y 10, protones; 3 y 4 (apenas visibles), mesones; 11 y 12, fragmentos del núcleo.

vadas ha hecho que se defina como mesón *toda partícula cuya masa esté comprendida entre la del electrón y la del protón.*

La radiación cósmica se estudia mediante la cámara de Wilson, y con placas fotográficas especiales. Como la energía de la radiación cósmica es extraordinariamente mayor que las producidas en los laboratorios, constituyen una eficaz arma para estudiar las desintegraciones producidas con energías tan elevadas.

En 1948, Gardner y Lattes, bombardeando diversos elementos con partículas α de 380 Me V producidas en el ciclotrón de Berkeley, obtuvieron mesones análogos a los de la radiación cósmica.

Radiactividad artificial

En 1934 el matrimonio Joliot descubrió bombardeando aluminio con partículas α, que al cesar el bombardeo el aluminio continuaba irradiando positrones. Estudiada esta radiación, se comprobó que seguía las mismas leyes que la radiactividad natural. Por primera vez se había fabricado una sustancia radiactiva en el laboratorio.

La radiactividad artificial arrojó mucha luz sobre la constitución del núcleo, y es uno de los medios de obtener positrones. Actualmente se pueden fabricar isótopos radiactivos de casi todos los elementos.

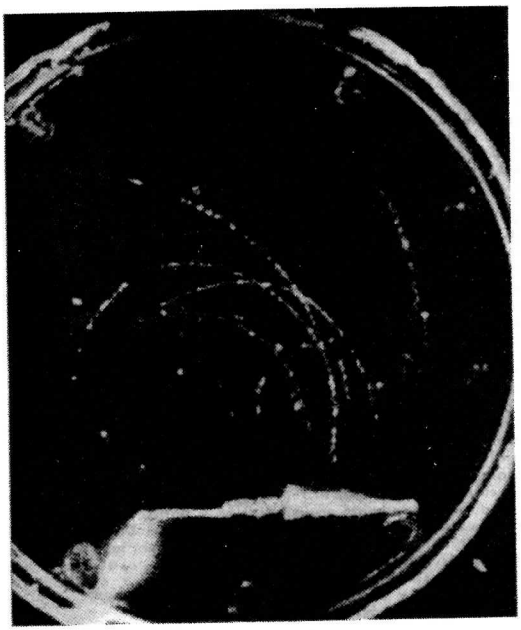


Lámina de carbono activada artificialmente con protones de 0,9 MeV; emite positrones.

34 LA LIBERACIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR

El 2 de diciembre de 1942, en una vieja cancha de pelota del estadio de fútbol de la Universidad de Chicago (E. U. de América), un grupo de hombres de ciencia, dirigidos por el físico italiano Enrique Fermi, logró hacer funcionar por primera vez un reactor atómico y puso así al servicio del hombre la más formidable fuente de energía: la energía nuclear.

Enrique Fermi.

Equivalencia entre masa y energía

Una de las consecuencias más importantes de la célebre *teoría de la relatividad* de Alberto Einstein es que la masa mecánica de un cuerpo es equivalente a una cierta cantidad de energía. La fórmula que las vincula es

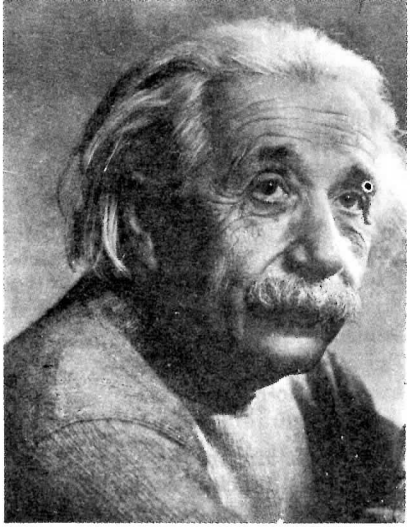
$E = mc^2$ (ley de Einstein)

siendo E la energía equivalente a la masa m del cuerpo, y c la velocidad de la luz.

Si, por ejemplo, una masa de 1 kg pudiera ser transformada íntegramente en energía, se obtendría una cantidad verdaderamente colosal:

$$E = m \cdot c^2 = 1\ kg \cdot (3 \cdot 10^8\ m/s)^2 =$$
$$= 1\ kg \cdot 9 \cdot 10^{16}\ m^2/s^2 =$$
$$= 9 \cdot 10^{16}\ J = 25 \cdot 10^{13}\ kWh$$

Si bien Einstein llegó a la fórmula por deducción teórica, no se trata de una simple "especulación teórica", como lo prueban de manera terminante la bomba atómica y la bomba de hidrógeno, en las que, como veremos, la trans-



Alberto Einstein

formación de masa en energía adquiere rotunda realidad.

Un ejemplo de la ley de Einstein lo tenemos en lo que ocurre en las transmutaciones por bombardeo: sea la ecuación de la desintegración de $^{14}_{7}N$ por partículas α y comparemos las masas antes y después de la reacción:

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O$$

$$\underbrace{14{,}007\,50 + 4{,}003\,89}_{18{,}011\,39} \qquad \underbrace{1{,}007\,54 + 17{,}004\,50}_{18{,}012\,07}$$

Antes de la reacción, las masas suman 18,011 39 unidades atómicas; después de la reacción, 18,012 07. Por lo tanto *se ha creado materia.*

¿Cómo es ello posible? La clave está en lo que ha ocurrido con la energía. Al hacer el balance de las energías se comprobó que:

Energía de la partícula α ($^{2}_{4}He$) *mayor* que energía del $^{1}_{1}H$ + energía del $^{17}_{8}O$

¡Se ha perdido energía!, y la energía perdida es justamente 1,16 Me V que, de acuerdo con la ley de Einstein es *exactamente* equivalente a 0,000 68 unidades atómicas de masa, es decir, a la cantidad de materia creada en la reacción.

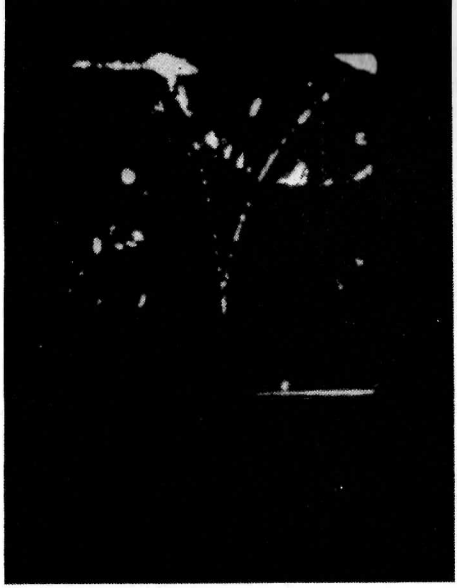
TABLA DE EQUIVALENCIAS ENTRE UNIDADES DE MASA Y DE ENERGÍA

	u. a. m.	*Me V*	*J*	*g*
1 unidad atómica de masa	1	923	$1{,}492 \cdot 10^{-10}$	$1{,}66 \cdot 10^{-24}$
1 Me V	$1{,}07 \cdot 10^{-3}$	1	$1{,}601 \cdot 10^{-13}$	$1{,}77 \cdot 10^{-31}$
1 J	$67 \cdot 10^{8}$	$625 \cdot 10^{10}$	1	$1{,}04 \cdot 10^{-7}$
1 g	$6{,}023 \cdot 10^{23}$	$5{,}6 \cdot 10^{30}$	$9{,}63 \cdot 10^{10}$	1

Otra experiencia espectacular es la siguiente: cuando un fotón γ de gran energía pasa por un campo eléctrico muy intenso, como en las cercanías de un núcleo, hay probabilidades de que el fotón γ se convierta en un positrón y un electrón. Este proceso de *materialización*, o, como se lo llama frecuentemente, *formación de pares*, es el que se observa en la figura de la derecha, obtenida por el matrimonio Joliot en 1933. Obsérvense las curvaturas de sentidos opuestos, y que una de las partículas tiene más energía. La energía del fotón γ empleado era de 2,62 Me V; la suma de la energía cinética y la masa del positrón y del electrón dan también 2,62 Me V.

Al estudiar el tema acústica pudo sorprender al lector que de la superposición de dos sonidos resulte silencio; en óptica pudo asombrarse de que la *luz* + *luz* pueda dar oscuridad. A pesar de todo esperamos que ahora se maraville al decirle que la suma de dos masas... ¡PUEDE DAR MASA NULA! Esto es lo que acontece cuando se encuentran una partícula y su antipartícula (por ejemplo, un electrón y un positrón) sus masas se anulan; pero del sitio donde se produjo el encuentro salen dos fotones. El cálculo de sus energías comprueba que las masas de las partículas se han transformado en esa energía.

En 1905, cuando Einstein expuso su fórmula, no pasaba de ser una especulación teórica. Afirmaba que 1 gramo de materia se podía convertir en 25 000 000 kWh. Pero, ¿cómo poner en libertad semejante energía? Einstein no lo sabía; nadie lo sabía. Pero los fenómenos radiactivos mostraban ya que en el seno de los átomos se escondía una fuente de energía prácticamente inagotable. ¿Cómo era posible, si no, que durante millones de años el uranio, el radio, y todos los elementos radiactivos estuviesen lanzando energía al espacio?



Materialización de un rayo γ.

La fisión nuclear

En 1934, Fermi y sus jóvenes colaboradores del Instituto de Física de Roma bombardearon uranio con neutrones. Los resultados fueron sorprendentes: aparentemente el uranio se transformaba en un nuevo elemento radiactivo... ¡de número atómico 93! En la naturaleza sólo existían hasta ese momento 92 elementos químicos; ahora el hombre "fabricaba" elementos trasuránicos. ¿Cómo se originaba este nuevo elemento? El neutrón era capturado por el núcleo de uranio; si no aconteciera nada más, se hubiera obtenido un isótopo del uranio. Pero el nuevo núcleo emitía un electrón, y su número atómico subía entonces de 92 a 93.

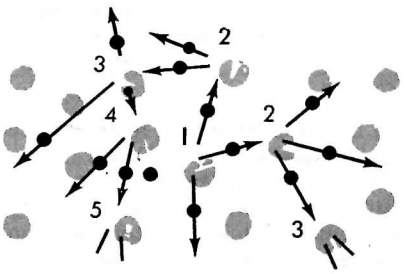
La importancia histórica de estas experiencias de Fermi no residió solamente en su valor científico (en realidad más adelante se demostró que la interpretación de las mismas no era totalmente correcta) sino en que produjo una

verdadera "carrera por los trasuránicos": todos los laboratorios importantes de Europa y América se lanzaron a la experimentación con uranio y neutrones para tratar de comprobar si Fermi tenía o no razón y también para tratar de "fabricar" nuevos trasuránicos. Y estas investigaciones con uranio y neutrones condujeron a resultados aún más sensacionales que aquellos que las habían inspirado.

En 1939, los físicos alemanes Hahn y Strassman comprobaron que, en ciertas condiciones, el bombardeo de uranio con neutrones originaba bario. A primera vista esto parece no tener mayor importancia, pero cuando se piensa que el número atómico del bario es 56, se advierte que el neutrón ha producido en el núcleo de uranio una extraña catástrofe: *lo ha partido en dos grandes pedazos.* O en términos científicos: los neutrones han producido la *fisión* del uranio.

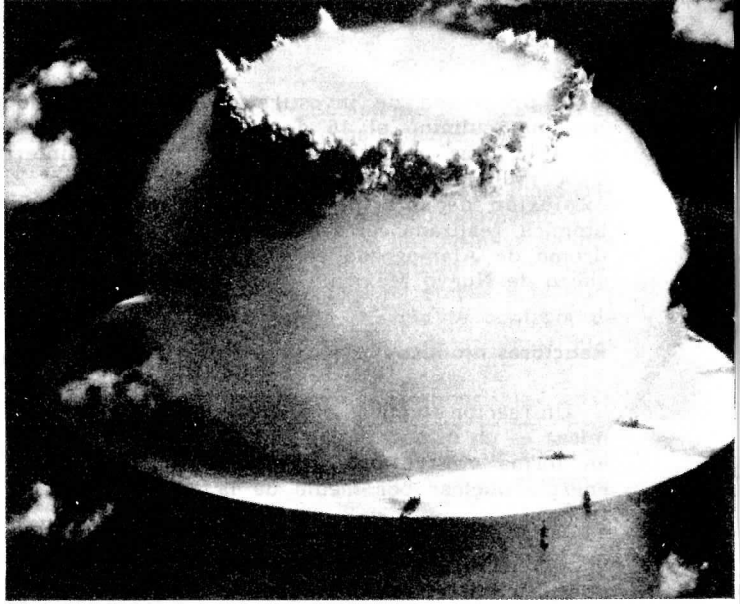
Pero esto no fue todo: pocos meses después, Joliot y sus colegas de París demostraron que cuando el átomo de uranio se partía en dos, quedaban en libertad, al mismo tiempo, varios neutrones, siempre en número superior a dos. Este descubrimiento no es otro que el de la *reacción en cadena*: supongamos que disponemos de una cierta masa de uranio contra la que disparamos un neutrón. Al producirse la fisión de un núcleo de uranio, se liberarán dos neutrones por lo menos. Estos dos neutrones pueden conducir a la desintegración de dos nuevos núcleos de uranio que, a su vez, producirán por lo menos 4 neutrones... y operando en esta forma se podría llegar a la fisión completa de toda la masa.

Reacción en cadena: neutrones producidos en las explosiones nucleares anteriores desintegran otros núcleos.



Pero hay algo más todavía: en cada fisión se producía una *pérdida* de masa de aproximadamente 0,20 unidades atómicas que, de acuerdo con la ley de Einstein, equivale a unos 180 MeV de *energía.*

Febrilmente se continuaba trabajando en los laboratorios y nuevos descubrimientos se anunciaban casi todos los meses: los neutrones lentos son más eficientes para producir fisión que los neutrones rápidos; ciertas sustancias (la parafina, el grafito, el agua pesada) frenan a los neutrones rápidos y los transforman en lentos; no es el abundante uranio 238 el que se fisiona por acción de los neutrones lentos sino el uranio 235, mucho más escaso (0,7 % solamente); ciertas impurezas de uranio, como el boro, por ejemplo, absorben los neutrones y, en consecuencia, detienen la reacción en cadena; se fabrican, no uno, sino dos "trasuránicos": el elemento 93, al que se denomina neptunio, y el elemento 94, plutonio, etc. Finalmente, en 1940 el físico danés Niels



Una de las explosiones atómicas de Bikini.

Bohr elaboró una teoría completa de la fisión nuclear en la que explicaba de manera coherente todos los resultados experimentados y demostraba la posibilidad de liberar, por medio de la fisión en cadena, la energía nuclear. Comparada con las energías producidas en algunas combustiones químicas, la energía liberada en la fisión es fabulosa:

1 g de hidrógeno ..	34 Kcal
1 g de nafta	11 Kcal
1 g de carbón	5 Kcal
1 g de uranio (fisión) ..	15 000 000 Kcal

Mientras se libraba la Segunda Guerra Mundial, y ante la posibilidad de utilizar esta nueva fuente de energía en la fabricación de una bomba, que sería por lo tanto mucho más poderosa que las conocidas hasta entonces, basadas en las modestas energías químicas, el gobierno de Estados Unidos de América decidió lanzar un vastí-

La primera pila nuclear de Fermi. La fotografía muestra parte de los elementos de grafito y de uranio

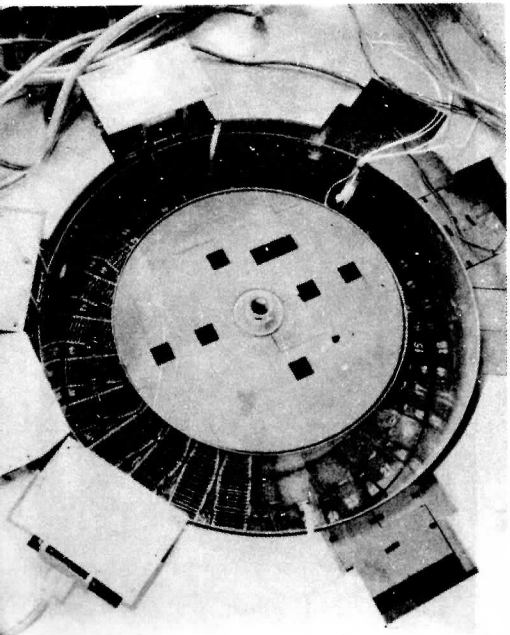
simo programa de investigaciones que culminó el 16 de julio de 1945, tras una inversión de 2 000 millones de dólares, con la explosión de la primera bomba atómica, realizada cerca del aeródromo de Álamogordo en el desierto de Nuevo México.

Reactores atómicos

Un reactor atómico (o pila atómica) es un dispositivo en el que, en forma controlada, se libera energía nuclear por medio de la fisión.

Para comprender su funcionamiento nada mejor que describir uno de ellos: el reactor argentino RA-1 (*R* por reactor; *A* por argentino; 1 porque es el primero) de la Comisión Nacional de Energía Atómica de la República Argentina. Éste es el primer reactor nuclear construido en Latinoamérica, inaugurado en enero de 1958 y que trabaja ininterrumpidamente desde entonces. El corazón del RA-1 está compuesto por dos recipientes de aluminio, cilíndricos, uno dentro del otro, de 90 cm de diámetro el de afuera y 60 cm de diámetro el de adentro, ambos de 120 cm de alto; estos dos cilindros alojan los elementos fundamentales del reactor: combustible, moderador, elementos de control y refrigerante.

Núcleo del reactor R.A.1. Obsérvense los dos tanques concéntricos de aluminio entre los cuales se encuentran los elementos combustibles



Combustible. Es el material que sufre la fisión bajo el bombardeo de neutrones. En el RA-1 el combustible es uranio conteniendo 20 % del isótopo ^{235}U, al que se denomina *enriquecido*, para diferenciarlo del natural, que sólo contiene 0,7 % ^{235}U. Se realiza este enriquecimiento para hacer más eficiente el proceso de fisión (al haber más átomos de ^{235}U la reacción en cadena se realiza más fácilmente) y para obtenerlo basta agregar ^{235}U puro al uranio natural hasta alcanzar el grado de enriquecimiento buscado.

El combustible está contenido en placas rectangulares de 1,60 cm de largo por 7 cm de ancho y 2,7 mm de espesor. Cada placa es sencillamente un sandwich, cerrado herméticamente por los cuatro costados: el "pan" es aluminio y el "jamón" una mezcla de uranio y aluminio. El combustible debe estar siempre herméticamente "enlatado" para impedir que ciertos elementos que se producen durante la fisión, como el xenón, argón, estroncio, etc., vayan al agua de refrigeración: esos productos son todos radiactivos y de ser arrastrados por el agua de refrigeración contaminarían con ra-

diactividad todo el reactor, con gravísimo peligro para las personas que trabajan en él.

Cada placa pesa 450 g y el reactor funciona con unas 150 placas. En este punto es necesario introducir un concepto muy importante: el de *masa crítica*. Dijimos antes que una vez que un átomo de ^{235}U ha sido fisionado por un neutrón, en la reacción se producen aproximadamente 2,5 neutrones más, que a su vez pueden fisionar otros núcleos y así sucesivamente, estableciendo la reacción en cadena. Pero como entre núcleo y núcleo de ^{235}U hay una enorme distancia –"enorme" comparada con las dimensiones de los neutrones–, la mayoría de éstos escapan sin llegar a chocar con los núcleos de ^{235}U y la reacción en cadena no se establece. Para que ésta comience y no se detenga, bastará con apilar una cantidad tal de ^{235}U que los neutrones que escapen sean menos que los que chocan. Esa cantidad mínima necesaria para que la reacción en cadena se ponga en marcha se llama *masa crítica*. Por otra parte, como el espacio está lleno de neutrones –la mayoría provenientes de los rayos cósmicos–, una vez alcanzada la masa crítica la reacción en cadena se inicia espontáneamente. Una bomba atómica no necesita, pues, detonante. Bastará juntar con toda rapidez la cantidad de ^{235}U que constituye la *masa crítica* para que la explosión se produzca. No debe extrañar entonces, que el dato de la masa crítica de ^{235}U (o de ^{239}Pu, empleado en las bombas de plutonio) haya sido uno de los secretos militares más celosamente guardados. Solamente se sabe que es de aproximadamente una decena de kilogramos.

Y bien: en el RA-1 la masa crítica es de aproximadamente 2 kg de ^{235}U. Para que no haya peligro alguno, esta cantidad de combustible se coloca en etapas y la liberación de energía se controla de la manera que describimos más adelante.

Las placas combustibles están dispuestas en forma radial, ocupando el espacio que dejan entre sí los dos recipientes de aluminio.

Moderador. Es el material que frena los neutrones y los transforma en neutrones lentos, los más eficientes para fisionar el ^{235}U. En el RA-1 se emplea grafito de alta densidad (cuanto más denso mayor es su poder de moderación) y elevada pureza (libre de elementos absorbedores de neutrones). Parte del grafito utilizado llena el recipiente interior; el resto (aproximadamente 1 500 kg) rodea los elementos combustibles.

Elementos de control. Regulan la velocidad de la reacción en cadena. En el RA-1 se efectúa con cuatro placas de cadmio (recubiertas de acero inoxidable para protegerlas de la corrosión) de 20 cm de largo por 20 cm de ancho y 0,5 mm de espesor. El cadmio es un material muy absorbente de neutrones y el control de la reacción es muy simple: cuando se quiere detener la reacción, basta *introducir* las placas; el cadmio absorbe muchos neutrones y la reacción se detiene; si se quiere poner en marcha el reactor basta *retirar* las barras; la velocidad con

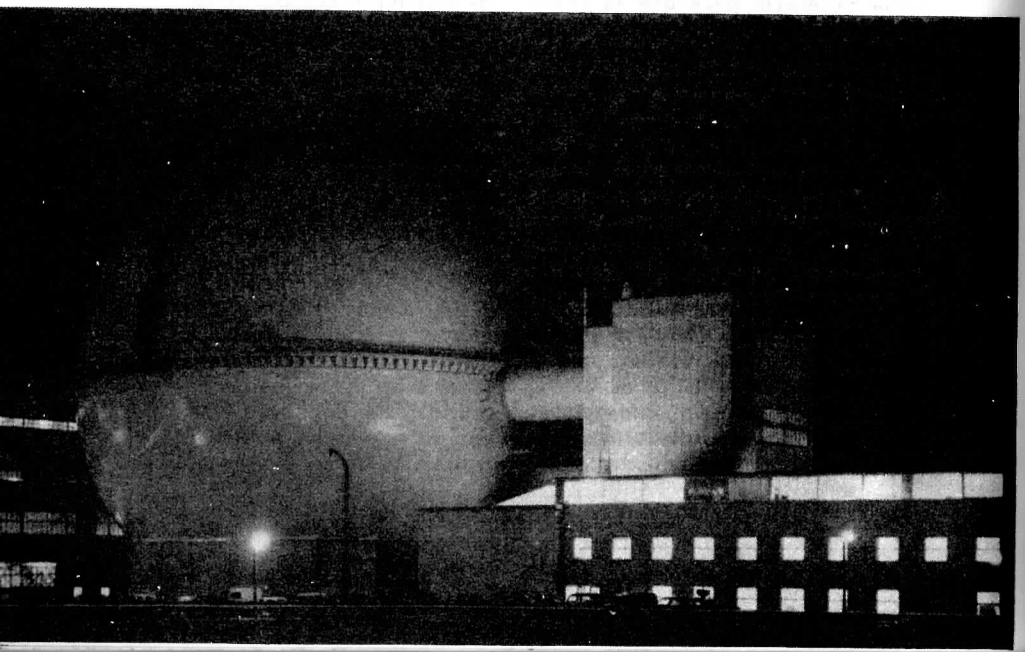
que se inicia la reacción en cadena está de acuerdo con la velocidad a la que se retiran las barras.

Refrigerante. Es el material que transforma la energía producida en las placas combustibles. En el RA-1 es agua desmineralizada, que circula por entre los elementos combustibles, retira el calor producido en éstos y lo transporta a un intercambiador de calor. Como el RA-1 es un reactor pequeño, de muy baja potencia (unos 20 kW), el calor disipado es pequeño y entonces no es económico utilizarlo. Los reactores de potencia, en cambio, producen enormes cantidades de calor (ya funcionan reactores de 350 MW = 350 000 kW) que se utiliza en la generación de energía eléctrica. El RA-1, en cambio, es un reactor de investigación y adiestramiento de personal y se lo ha empleado intensamente en la producción de radioisótopos artificiales (sodio, potasio, oro, fósforo, azufre), cuyas aplicaciones describimos más adelante. Próximamente la Comisión Nacional de Energía Atómica inaugurará, en Ezeiza, un segundo reactor de mucha mayor potencia (hasta 5 000 kW), íntegramente diseñado, proyectado y construido en la Argentina.

Los radioisótopos. Una de las aplicaciones más importantes de los reactores es la producción de radioisótopos, que son simplemente isótopos de elementos que normalmente no son radiactivos, radiactivizados artificialmente por acción del bombardeo de los neutrones.

Así, por ejemplo, el cobalto que se encuentra en la naturaleza

Vista nocturna del reactor atómico de Dounreay (Escocia), uno de los de más avanzado diseño



Tratamiento de un tumor cerebral con una bomba de cobalto 60.

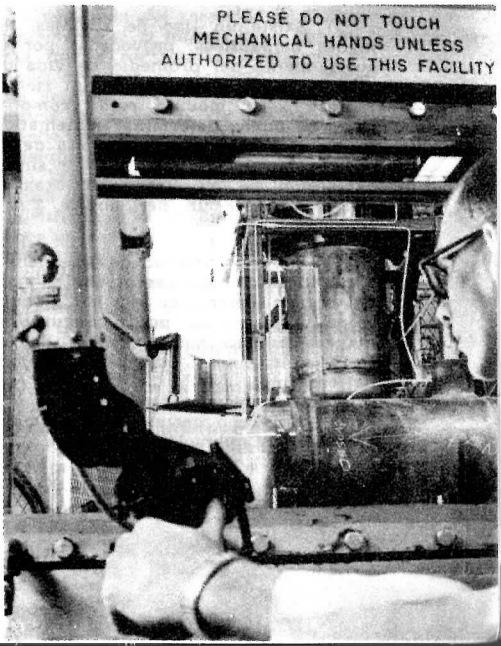
($^{59}_{27}Co$) no es radiactivo; en cambio lo es su isótopo, $^{60}_{27}Co$; para prepararlo se bombardea $^{59}_{27}Co$ con neutrones y la reacción es:

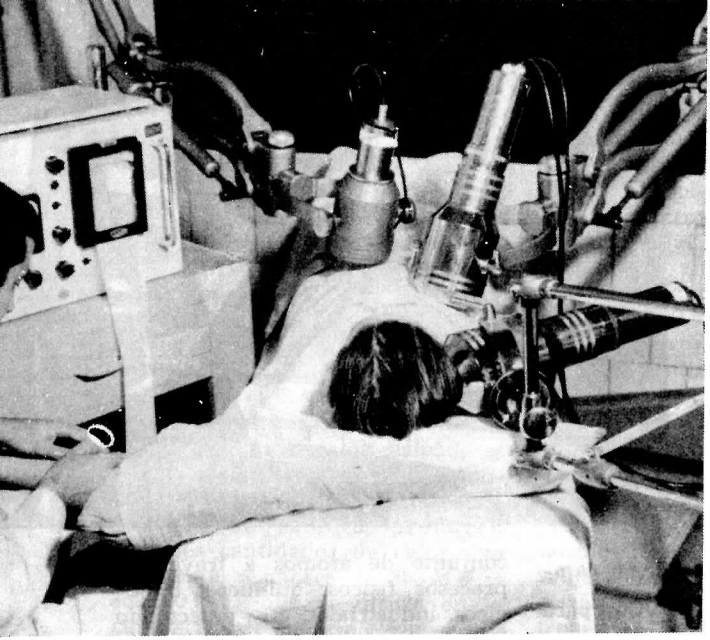
$$^{59}_{27}Co + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma$$

Éste es el famoso cobalto 60 de las llamadas *bombas de cobalto*, empleadas cada vez más en el tratamiento del cáncer: al desintegrarse el Co, por ser radiactivo, emite radiaciones que, en numerosos casos, son capaces de destruir los tumores cancerosos. Se trata, pues, de una bomba pacífica y las únicas explosiones que en ella se producen son las de los núcleos de los átomos de Co, a medida que se desintegran. En la Argentina se han instalado numerosas bombas de cobalto.

Como un isótopo radiactivo emite radiaciones y éstas se pueden detectar (por ejemplo con un contador Geiger-Müller), el isótopo *denuncia* en cada momento dónde se encuentra. Se puede entonces seguir la evolución de un conjunto de átomos a través de procesos físicos, químicos, biológicos, industriales, etc., *detectando* la radiación emitida por radioisótopos incorporados a ese conjunto de átomos. El radioisótopo sirve

Los isótopos radiactivos son muy peligrosos de manipular debido a las radiaciones que emiten. Por ello se los guarda cuidadosamente, y para manejarlos se emplean "manos" mecánicas.





Estudio del funcionamiento del hígado empleando iodo 131.

así como una marca identificadora para el conjunto en todas y cada una de las etapas de interés. Esto permite un número prácticamente ilimitado de aplicaciones.

Veamos algunos ejemplos interesantes:

1) Existe un tipo de anemias, llamadas hemolíticas, provocadas por un acortamiento del promedio de vida del glóbulo rojo. Incorporando un isótopo radiactivo al glóbulo rojo (como el Cr^{51}) se puede determinar matemáticamente el grado de acortamiento de dicho promedio de vida, por la simple extracción de muestras alícuotas de sangre durante un período de 2 a 3 semanas.

2) En una variedad de las anemias hemolíticas el bazo desempeña el papel de órgano destructor de los glóbulos rojos. Esto no se podía asegurar de manera precisa hasta después de extirpar el órgano y observar la mejoría del enfermo.

Con los isótopos radiactivos se puede predecir con certeza matemática el efecto de la operación quirúrgica sobre la anemia.

Incorporado el Cr^{51} a los glóbulos como en el ejemplo anterior, se estudia la radiactividad presente en el bazo y el hígado mediante un detector externo. En el individuo normal esta relación es de 1/1. Cuando esta relación es de 4/1, o superior, a favor del bazo, existe un 92 % de probabilidades de que la anemia desaparecerá o mejorará espectacularmente.

3) El estudio del movimiento de arena y otros sedimentos en fondos fluviales o marítimos tiene excepcional importancia para el proyecto de construcción o modificación de grandes obras de ingeniería, como puede ser el dragado de canales de navegación, canales de acceso, escolleras de protección, diques y puertos.

En el caso del puerto de Mar del Plata, por ejemplo, existe el problema de la necesidad de dragar continuamente el canal de acceso al mismo, invadido por el aporte de arena que, desbordando el frente de la escollera sur, se deposita frente a la boca del puerto y en las playas que comienzan en la escollera norte.

Para determinar la factibilidad de una instalación capaz de derivar el aporte de arena traído desde el sur por

la corriente y depositarlo al norte del puerto, se decidió realizar un estudio general del movimiento de las arenas en las inmediaciones de éste, movimiento que se debe no sólo a la corriente general mencionada, sino a las corrientes parciales originadas en la existencia de las dos escolleras y en el flujo y reflujo de la marea.

A tal efecto, se realizó la marcación de arena en cantidades apreciables con Ag-110, y se la depositó en lugares predeterminados del fondo marino. Muestreos sistemáticos de toda el área espaciados en el tiempo, permitieron valorar el desplazamiento de fondos y obtener conclusiones sobre la conveniencia real de las obras proyectadas. En particular, la demostración inequívoca de que las arenas depositadas al norte del puerto retrocedían parcialmente hacia el sur, por acción de las mareas, hizo notar que el influjo de la corriente no era siempre el que prevalecía, y llevó a aconsejar un nuevo análisis de la obra en cuestión.

4) La localización de tumores cerebrales se efectúa aprovechando el hecho de que los tumores lesionan la barrera que en el cerebro impide la transferencia de ciertas sustancias de la sangre al tejido cerebral, permitiendo la acumulación transitoria de tales sustancias en la zona afectada. La inyección de seroalbúmina humana marcada con Iodo 131 (radiactivo) hace que, al producirse la acumulación mencionada, se concentre en el tumor la mayor parte del Iodo; detectado con un instrumento adecuado, resulta localizado el tumor.

5) Los estudios de metabolismo vegetal, relacionados con el movimiento de los elementos nutritivos minerales en las plantas, han avanzado en forma insospechada merced al uso de Fósforo 32, Azufre 35, Calcio 45, Hierro 55, Cinc 65, Carbono 14 y otros nucleidos. Entre numerosos trabajos realizados hasta ahora, puede mencionarse el estudio de la absorción de calcio en las plantas de maní, que demostró que tal absorción se realiza a través de las raíces y los frutos, y que la cumplida por medio de las primeras no basta para el desarrollo de la planta.

El uso de los fertilizantes, tanto los comerciales como los abonos verdes, está recibiendo un aporte considerable de la investigación efectuada con trazadores. El estudio del adecuado suministro y localización de los fertilizantes ha llevado a aumentar la eficiencia de su empleo; se pudo así llegar a conclusiones claras sobre las mejores condiciones para el agregado de sustancias nutritivas. Un ejemplo sobre el particular lo constituye la demostración de que las plantas absorben elementos nutrientes no sólo por medio de las raíces, sino que utilizan también el follaje, los frutos, el tronco, las ramas y aun las flores. Estos trabajos se realizaron empleando Fósforo 32.

6) Durante el trabajo normal de los oleoductos en las paredes internas del conducto va depositándose una capa de materiales residuales que, poco a poco, reducen la sección útil de transporte. Para eliminar esas incrustaciones perjudiciales, periódicamente se introduce en el conducto un dispositivo raspador provisto de hojas metálicas que separan por corte el material depositado sobre las paredes del tubo. Ese raspador se mueve a lo largo del oleoducto por centenares de kilómetros, impulsado por la presión de los equipos de bombeo.

En ocasiones, la presencia de una masa excesiva de material a eliminar provoca el atascamiento del raspador, que queda así detenido en su recorrido obstruyendo el oleoducto en un lugar desconocido del trayecto, siendo necesario encontrarlo para solucionar la interrupción del servicio.

La búsqueda del raspador se facilita enormemente si el mismo lleva una pequeña fuente radiactiva. Basta entonces con recorrer el trayecto del oleoducto con un detector, hasta que éste denuncie la presencia de la fuente y, por ende, del raspador. La disminución del tiempo requerido para ubicar el sitio de la interrupción, posibilitando la apertura del oleoducto y la eliminación de la dificultad en el lugar indicado se traduce en considerables beneficios económicos.

7) Otro uso de los radioisótopos, muy difundido, es aprovechar los rayos gamma que emiten para hacer radiografía industrial, comúnmente llamada *gammagrafía*.

El principio de la gammagrafía industrial es similar al de la radiografía convencional: la interposición de un cuerpo en el haz emergente de una fuente de radiación gamma producirá

una absorción proporcional al espesor y a la densidad del material atravesado. Si el flujo remanente se utiliza para impresionar una película sensible, se obtendrá en ésta una imagen de las zonas más o menos espesas y más o menos densas de la pieza gammagrafiada.

En estos momentos la gammagrafía, nacida con las fuentes de radium como modesta competidora de los equipos de rayos X industriales, está encaminada a desplazarlos completamente por reunir apreciables ventajas de carácter económico y operativo. En efecto, los equipos para gammagrafía industrial cargados con fuentes de Cobalto 60, Cesio 137, Iridio 192 y Tulio 170 agregan a su menor costo, su independencia de las líneas de suministro de energía eléctrica y una mayor flexibilidad.

Su uso principal es la inspección no destructiva de piezas fundidas o soldadas, que tiene por objeto la ubicación y evaluación de defectos que, como las sopladuras e inclusiones en las primeras y las grietas o fisuras en las segundas, disminuyen las cualidades tecnológicas de los productos terminados permaneciendo inaccesibles al examen visual.

Gran difusión han tenido los equipos para medición continua de espesores de productos laminados. En la elaboración de tales productos suele tener mucha importancia la tolerancia con que se ajusten a las especificaciones relativas a la constancia de espesor, y el mantenimiento del material dentro de esas tolerancias puede ser decisivo en cuanto a su calificación como producto de primera calidad.

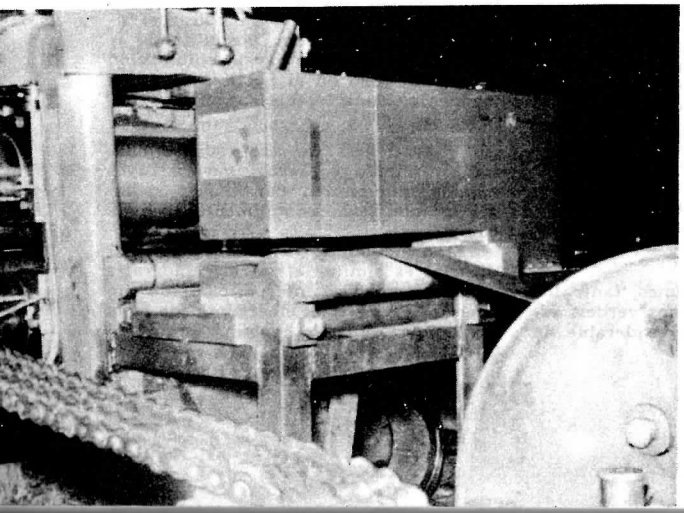
Entre los métodos que permiten medir el espesor de la lámina en movimiento, cuando existe la posibilidad de variar las condiciones de fabricación, los más dúctiles y seguros son los basados sobre el empleo de material radiactivo. El producto cuyo espesor se desea medir circula entre una fuente radiactiva y un detector adecuado, cuyo registro del haz que atraviesa la lámina está condicionado por el espesor de material interpuesto.

Con este tipo de equipos se puede medir láminas de materiales muy diversos: plásticos, papel, vidrio, goma, metales, en condiciones de fabricación muy variables y en cualquier etapa del proceso.

8) Una aplicación de los efectos de la radiación sobre la materia que ha brindado excelentes resultados en un campo afín al de la agricultura, es el de esterilización de insectos, como parte de la lucha contra las plagas.

Un ejemplo que se ha tornado clásico es la eliminación casi total de una variedad de moscas en una isla del Caribe, cuyas larvas causaban graves daños al ganado. Se aprovechó el hecho de que las hembras sólo acoplaban con un macho, para esterilizar una gran cantidad de éstos que luego se liberaron. Los huevos procedentes de la unión de las hembras con los machos estériles no fructificaron, produciendo la disminución de la población en la generación siguiente; sucesivas irradiaciones llevaron la especie al borde de la extinción total.

9) Finalmente, cabe citar los trabajos efectuados en el sentido de producir electricidad directamente a partir de la energía de desintegración del material radiactivo. De entre los numerosos dis-



Medición continua del espesor de un fleje metálico, realizada empleando un isótopo radiactivo durante el proceso de laminación.

positivos ideados, tal vez uno de los más sencillos y eficientes sea el que convierte el calor producido durante la desintegración en electricidad, aplicando el principio de las termocuplas. El flujo de corriente se efectúa a causa de la diferencia de temperatura entre la unión fría y la unión caliente de la cupla, estando ésta sometida a la acción de una fuente muy activa de un radioisótopo adecuado. Este dispositivo se emplea en algunos satélites artificiales como fuente de energía eléctrica para alimentar los equipos de transmisión radial.

El primer compuesto de plutonio que se consiguió pesar (10 de setiembre de 1942). El compuesto, óxido de plutonio, aparece señalado con una flecha formando una costra cerca del extremo de la naveta de platino en que fue pesado, y que es sostenida con unas pinzas. La muestra de óxido de plutonio pesó 2,77 μg (X 20).

Los elementos trasuránicos. Se conocen diez: el *neptunio* (Np) de número atómico 93; el *plutonio* (Pu), de 94; el *americio* (Am), de 95; el *curio* (Cm), de 96; el *berkelio* (Bk), de 97; el *californio* (Cf) de 98; el 99 *einsteinio* (E); el 100 *fermio* (Fm); el 101 *mendelevio* (Mv) y el 102 *nobelio* (No).

El neptunio fue aislado en 1940 por Mc Millan y Abelson, luego de producirlo con el ciclotrón del Instituto Tecnológico de California. El núcleo $^{238}_{92}U$ capta un neutrón y se produce el isótopo $^{239}_{92}U$; éste es radiactivo, de 23 min de vida media, emite un electrón y se transmuta en $^{239}_{93}Np$. También se ha obtenido el isótopo $^{237}_{93}Np$, menos inestable que el anterior.

El plutonio fue preparado por Glenn T. Seaborg en 1942. Posiblemente sea el trasuraniano de mayor importancia, pues tiene la propiedad de ser fisionable y producir reacción en cadena. Es el primer trasuránico encontrado en la naturaleza después de haber sido preparado en el laboratorio.

El americio, el curio, el berkelio y el californio también fueron preparados por Seaborg y sus colaboradores en la Universidad de California; los dos últimos en 1950.

Los trabajos de Mc Millan y Seaborg fueron motivo de que se les otorgara el Premio Nóbel de Física en 1951.

La fusión nuclear

El núcleo de helio está constituido por dos protones y dos neutrones. La masa de un protón es 1,007 57 u. a. m.; la de un neutrón, 1,008 93; luego:

$$2\,{}^{1}_{0}n + 2\,{}^{1}_{1}H = 2 \cdot 1{,}008\,93 +$$

$$+ 2 \cdot 1{,}007\,57 = 4{,}033\,00 \text{ u. a. m.}$$

Pero la masa del núcleo de helio es 4,002 79; de modo que al fusionarse dos protones con dos neutrones para formar un núcleo de helio, desaparece una masa

$$\Delta m = 4{,}033\,00 - 4{,}002\,79 =$$

$$= 0{,}030\,21 \text{ u. a. m.} \cong 0{,}03 \text{ u. a. m.}$$

Esa desaparición de masa significa que se ha liberado una energía equivalente, que se puede calcular con la fórmula de Einstein:

Gleen Seaborg, el "fabricante de trasuránicos".

$$E = \Delta m \cdot c^2 = (0{,}03 \text{ u. a. m.}) \quad (3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s})^2 =$$

$$= (0{,}03 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-24} \text{ g}) \quad (3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s})^2 \cong 0{,}45 \cdot 10^{-4} \text{ erg}$$

$$E = 0{,}45 \cdot 10^{-4} \text{ erg} \cong 28 \text{ Me V}^*$$

En la formación de un núcleo de He^4, pues, se libera una energía de 28 Me V. En la formación de otros núcleos también se libera energía, mientras que en la formación de otros hay absorción de energía, como en las reacciones exotérmicas y endotérmicas.

La bomba de hidrógeno

La fusión nuclear y la fisión nuclear son, en cierto modo, procesos inversos. En aquélla, la *reunión* de varias partículas para formar un núcleo se realiza con desprendimiento de energía; en ésta, la *separación* del núcleo en partes se realiza con desprendimiento de energía; en ambos casos, si se quiere fabricar una bomba, es necesario producir reacciones en cadena.

Probablemente la reacción de la bomba de hidrógeno sea

$$_1^1H + {}_1^3H \longrightarrow {}_4^4He$$

es decir, la formación de un núcleo de helio por fusión de un protón con un tritón.

Uno de los problemas prácticos es producir una temperatura de unos 20 millones de grados, pues solamente a esas temperaturas se produce una reacción de fusión en cadena. Ese problema ha sido resuelto con la fabricación de bombas atómicas, pues durante su explosión se alcanzan temperaturas de ese orden. Es probable que la bomba H esté constituida por una bomba A que desempeñe la función de "fulminante"; su explosión produce la temperatura necesaria para la fusión en cadena, y entonces estalla la bomba H.

En noviembre de 1952, el gobierno de EE. UU. anunció el estallido de la primera bomba H.

* Para hacer estos pasajes de unidades empleamos la tabla de págs. 518-519.

¿Dónde estudiaré Física en la Argentina?

Los estudios de Física pueden realizarse tanto en las universidades como en los institutos del profesorado.

En las universidades, la licenciatura de Física tiene una duración variable, según cada una de ellas. Término medio oscila entre 4 y 5 años. El licenciado que desee optar al título de doctor debe rendir algunas materias adicionales y realizar un trabajo original de investigación.

La preparación de su tesis doctoral puede realizarla incorporándose a cualquiera de los diversos institutos especializados del país, que funcionan en las universidades nacionales de Buenos Aires, La Plata, Córdoba, Tucumán o Cuyo. El instituto de Física José A. Balseiro, que funciona en San Carlos de Bariloche, fue creado por convenio entre la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Universidad Nacional de Cuyo.

Por lo general, al cabo de 2 ó 3 años de incorporado a uno de esos institutos, el investigador tiene oportunidad de proseguir sus trabajos en un acreditado instituto extranjero, al que se lo envía en carácter de becado. Allí completará su tesis doctoral.

Por su parte, los Institutos Superiores del Profesorado preparan profesores en la especialidad.

El doctor en Física tiene abierto camino para trabajar en cualquiera de los institutos de investigación, así como en la docencia universitaria. Además, hay un creciente interés por la colaboración con las industrias del país para las cuales será de gran beneficio la participación de físicos en sus diferentes actividades.

Los profesores de Física egresados de institutos superiores del profesorado tienen su campo de acción específico dentro de la docencia; pero también pueden dedicarse a la especialización y la investigación.

INDICE TEMATICO

Acelerador de partículas 516
– de Van der Graff 209
– de Lawlance 516
acumulador de plomo 311
– principio del 311
aislador 220
– constante de un 377
– de electricidad 192
– y la constante dieléctrica 338
aisladores, tabla de 339
ampere, unidad de intensidad de la corriente eléctrica 232
amperímetro 233, 398, 416
amplificación, factor de 470
amplificadora de señales 472
análisis espectral 132
ánodo 291, 468
anteojo, astronómico de Képler 87
– binocular 88
– terrestre de Galileo 88
arco eléctrico 285
astigmatismo 77
atómica, masa 502
atómico, dimensiones del Universo 217
– número 502
átomo 212, 454, 496
– interior del 216
– núcleo del 218, 511
– tamaño de un 212
atracción y repulsión eléctrica 189
audiofrecuencia, ondas de 473
autoinducción 409
– circuito de 431
– coeficiente de 412

Balanza magnética 320
– electrostática 343
bandas, espectros de 136
Barlow, rueda de 394
batería 343
Becquerel, descubrimiento de 215
Beer, ley de 140
Bell, teléfono de 413
bobina (solenoide) 359
– con núcleo metálico 376
– de ignición 426
– de Ruhmkorff 426
– reactancia inductiva de una 434
Bohr, átomo de 498
– tabla de 501
bolómetro 128
bombardeo, proyectiles atómicos 520
Branly, cohesor de 448
Brewster, ley de 161
brújula 185
– patrón 323
bujía decimal 14
Bunsen, fotómetro de 19

Campo eléctrico 195, 329
– distribución superficial de las cargas en un 196
– en las convexidades 197
– fuerza en un 343
– en el interior de un conductor hueco 197
– poder de las puntas 198
– sentido de las líneas de fuerza 195
campo electromagnético, detección del 446
– propagación del 446
campo magnético 176, 319, 351
– creado por corrientes 351
– de un solenoide 359
– distribución superficial de las cargas 196
– en el interior de un conductor hueco 197
– en las convexidades 197
– fuerza magnética y distancia 320
– fuerza sobre un conductor 392
– intensidad de 323
– intensidad de campo y líneas de fuerza 325
– poder de los puntos 198
– sentido de las líneas de fuerza 195
– transversal 460
– uniforme 326

– y densidad de flujo de inducción 378
– terrestre 182
– – intensidad 326
campos eléctrico y magnético, interacción 362
Compton, efecto de 493
catódicos, oscilógrafo de rayos 467
– rayos 466, 467
cátodo 291, 498
célula fotoeléctrica 456
ciclotrón 516
cinematografía en relieve 171
circuito con R. L. C. 439
– de C. A., con resistencias, solenoides y condensadores 427
– de resonancia 440
– de una resistencia óhmica 428
– magnético 386
– oscilante 444
– que sólo tiene autoinducción 431
– transmisor de Marconi 448
circuito eléctrico, elementos de un 228
color, de las 125
– frecuencia 123
– índice de refracción 125
– invisible 127
– longitud de onda 124
– y luz 122
condensador, campo y diferencia de potencial 332
– capacidad de un 336
– carga de un 334, 336
– de papel 340
– descarga de un 334
– electrolítico 340
– energía de un 341
– intensidad del campo eléctrico uniforme de un 333
– potencial de ruptura del aislante de un 338
– reactancia capacitativa de un 437
– sentido y dirección de $\vec{E}$ 333
– tensión entre las placas de un 330
– variable 340
condensadores, acomplamiento de 339
– usuales 339
conductor 220
– capacidad de un 348
– potencial de un 345
– resistencia de un 258
– variación de la resistividad con la temperatura 261
conexión, de aparatos en paralelo o derivación 265
– de aparatos en serie 264
– mixta 267
constante, de Faraday 295
– de Plank 481
– dieléctrica de un aislador 337
contador de Geiger-Müller 458
Coolidge, tubo de 480
corto circuito 282
corriente eléctrica 225
– alterna (CA) 416
– alterna, f.e.m. eficaz de una 424
– generación de 365
– intensidad eficaz de una 424
– rectificación de la 441
– – y corriente continua, diferencia 423
– continua (CC) y alterna (CA) 233
– inducida 364
– inducida en un conductor móvil 407
– intensidad de una 232
– efecto magnético de una 229
– efecto químico de una 229
– efecto térmico y luminoso de una 229
– medición de la intensidad de 233
– parásita o de Foucault 366
– rectificación 441
– sentido de la 231
corrientes eléctricas producidas por magnetismo 361
Cottrell, precipitador de 341
coulomb, unidad de cantidad de electricidad 232
Coulomb, ley de 321
cristales, birrefringencia 163, 166

– que hacen ver doble 163
– – eje óptico 163
– – plano principal 164
– velocidad de los rayos ordinarios y extraordinarios 165
cuanto 491
cuantos, teoría de los 485
cuba electrolítica 291

Daniell, pilas de 304, 307
declinación magnética 183
descarga, de cuerpos conectados a tierra 221
– de un condensador 334
– eléctrica 230
descargas en gases enrarecidos 465
Descartes, fórmula de 37
desintegración radiactiva espontánea 509
diamagnéticas, sustancias 379
diapasón 116
diferencia de potencial 240
– entre dos puntos 244
– medición de la 247
– significado físico de la 242
– unidad de 242
– variable 269
difracción de la luz 151
– redes de la 155
dínamo, principio de la 367
diodo 469
dioptría, unidad de potencia de una lente 73
dispersión de la luz 123
distancias siderales 12
Doppler, efecto 133

Eco 119
Eddy, corrientes parásitas de 366
Édison, Tomás A., inventos de 284, 287, 414
efecto fotoeléctrico (Einstein) 491
– Seebeck 314
– termoiónico 456
Einstein, fórmula de 493, 525
eléctrica, atracción y repulsión 189
electricidad, conductores y aisladores 192
– por frotamiento 189, 219
– primera ley 191
electricidades, positiva y negativa 194
electrodinamómetros 398
electrodos 291
electroimán, de Faraday 364
electrólisis 290
– aplicaciones 301
electrólitos 296
electrolíticos, procesos 299
electrómetro de Wulf 330
electromotriz, serie 306
electrón 213, 455
– carga específica 461
– volt, unidad de energía 459
electrones, cómo dirigir 459
– cómo identificar 461
– cómo obtener 456
– cómo "ver" 458
– corriente de 225
– fotográficos 459
electrónica, válvula 468
electroquímica 290
electroscopio 190, 193
electrostáticos, interpretación de los fenómenos 219
emergencia, ángulo de 61
emisión, de cátodo frío 457
– espontánea (rayos β) 457
energía eléctrica, cálculo de la 242
– generadores de 227
– unidades de 238
energía y corriente eléctrica 224
energía nuclear, bomba de hidrógeno 538
espectral, análisis 132
espectrales, series 137
espectro electromagnético 448
espectrofotómetro registrador 141
espectro de absorción 130, 137
– de bandas 136
– de emisión 129
– de una sustancia 135
– magnético 176
– magnético del campo 355
espectrógrafo 139
espectrómetro registrador 141
espejismo 58

espejos, aplicaciones 41
– cóncavos 31
– – construcción de imágenes 34
– – distancia focal 33
– – focos conjugados o de Descartes 37
– – foco principal 32
– – imagen de un objeto 33
– – imagen de un punto del eje 35
– – posición de la imagen 36
– – imagen real 34
– – tamaño de la imagen 38
– – rayos principales 32
– convexos 39
– – focos conjugados 40
– de Fresnel 148
– esféricos, abertura 30
– – centro de curvatura 30
– – eje principal 30
– – vértice 30
– planos 27
– – imagen virtual 28
extracorrientes 366

Faraday, caja de 204
– constante de 295
– convención de 374
– efecto 363
– – aplicaciones del 403, 413
– electroimán de 364
– experiencias de 361
– jaula de 205
– ley de 405, 408
– principio de la conservación de la energía 408
– leyes de (electrólisis) 292
ferromagnéticas, sustancias 380
fisión nuclear 527
Fizeau, método para calcular la velocidad de la luz 9
fluidos magnéticos 385
flujo, de campo y de inducción 377
– rápidamente variable 417
– de inducción, densidad a través de un núcleo 378
– – variación 403
– – velocidad de variación del 404
– – unidad de densidad de magnético 374
– – a través de un solenoide 375
– – superficie oblicua 375
– – unidad de 374
fluorescente, tubo 466
focos conjugados, fórmula 40
fonógrafo 414
fotoelasticidad 171
fotoelectrones, velocidad 488
fotografía 88
– instantánea y cinematográfica de una onda 102
fotometría 13
fotómetro 17
– de Bunsen 19
– fotoeléctrico 20
fotones 491
Foucault, corrientes parásitas de 366
– método para calcular la velocidad de la luz 9
Franklin, pararrayos de 204
Fraunhofer, líneas de 131
frecuencia umbral 490
Fresnel, espejos de 148
Friedrich y Knipping, experiencia de 482
fuerza, de un campo eléctrico 343
– de un campo magnético sobre un conductor 392
– electromotriz 237
– de termocuplas 315
– de una CA 424
– de un generador 249
– instantánea, valor de la 421
– magnética y distancia 320
– termoeléctrica 314
– y resistencia total 257
fusible 282
fusión nuclear 537

Galileo, anteojo terrestre de 88
– velocidad de la luz 7
galvanómetro 233
– de bobina móvil o de D'Arsonval 394
galvanoplastia 292
gauss, unidad de densidad de 378
Gaviola, Enrique, telescopio 43
generador, circuito eléctrico 228
– fuerza electromotriz de un 249

– y la diferencia de potencial entre sus bornes 248
generadores, acoplamiento de 270
– de energía eléctrica 227
Gilbert, Guillermo, el magnetismo y la electricidad 187
gilbert, unidad de fuerza magnetomotriz 388
Goldstein, rayos canales de 507

H
artl, disco de 26
helio, descubrimiento 133
hemipila 305
– de hidrógeno 305
Hertz, circuito receptor de 447
– circuito transmisor de 447
– experiencias de 447
hidrógeno, bomba 538
hiperrnetropía 77
histérisis 383
Hopkinson, ley de 386
Huygens, principio de 108

gnición, bobina de 426
iluminación 14
– eléctrica 283
– imagen de un objeto 33
– de un punto en el eje 35
– fantasma 157
– persistencia de la 79
– posición de la 36
– real 34
– tamaño de la 38
– virtual 28
imán 173
– polos de un 175
– artificiales 173
– líneas de fuerza 178
– naturales 173
– polos 175, 178
– quebrados 177
incidencia, ángulo de 26
inclinación magnética 184
inducción electromagnética 363
– electrostática 199
inductancia o reactancia inductiva de una bobina 434
interferencia, con luz blanca 149
– en la casa y la calle 149
– luminosa 146
interferómetro de Michelson 150
iones 219
– y la electrólisis 297
isótopos 507

J
abón, pompas de 150
Joule, efecto 281
– ley de 279, 281
– luchas contra el efecto 282

K
épler, anteojo astronómico de 87

L
eiden, botella de 335
lente 64
– potencia de una 72
– unidad de potencia 73
– convergente 65
– – centro óptico 65
– – construcción de imágenes 67
– – distancia focal 66
– – eje principal 65
– – focos 66
– – rayos principales 67
lente divergente 70
– – centro óptico 70
– – eje principal 70
– – posición de la imagen 71
Lenz, regla de 365
liberación de la energía nuclear 525
líneas de absorción 131
– de emisión 131
longitud de onda 98
lumen, unidad de cantidad de luz 22
lupa 80
– aumento 82
– aumento eficaz 80
– distancia focal y aumento eficaz 81
lux, unidad de iluminación 16
luz 3
– cantidad de 20
– cantidad recibida por superficie 21
– difracción 151
– dispersión de la 122
– en la sombra 151
– geometría de la 4
– naturaleza ondulatoria de la 142
– propagación de la 6
– reflexión de la 25

– refracción de la 48
– y color 122
– velocidad de la 1, 7
– y sensación luminosa 5
Magnética, declinación 183
– inclinación 184
– masa, o intensidad de polo 320
– permeabilidad 180
magnético, campo 176
– campo creado por un solenoide 371
magnéticos, circuitos 386
– fluidos 385
– materiales modernos 383
magnetismo 172
– hierro y acero 174
– imanes naturales y artificiales 173
– inducido 181
– obtención de las bajas temperaturas 327
magnetómetro 371
máquina de Rowland 352
máquinas electrostáticas 208
Marconi, circuito transmisor de 448
masa y energía, equivalencia 525
materia, electricidad y magnetismo 211
materia y electricidad 216
– cómo se descargan los cuerpos conectados a tierra 221
– inducción 221
– y magnetismo 221
maxwell, unidad de flujo 375
Michelson, medición de la velocidad de la luz 11
– interferómetro de 150
micrófono 413
microscopio 82
– aumento del 82
– binocular 83
– electrónico 212
– poder separador del 84
– usos del 86
Millikan, experiencia de 462
miopía 77
movimiento absoluto y el éter 150
movimiento ondulatorio, fases de un 103
movimientos de las estrellas 133
Newton, naturaleza de la luz (1ª hipótesis) 3
Nicol, prisma de 166
nomenclatura nuclear 513
núcleo atómico 497
– constituyentes del 512
– radio del 512
Oersted, aplicaciones del efecto 389
– efecto de 371
– experiencia de 352
– unidad UGS de campo 323
ohm, unidad de resistencia eléctrica 254
Ohm, ley de 252, 254
– relación entre voltaje y amperaje 252
– unidad de resistencia eléctrica 254
ojo humano 274
– ángulo de separación 79
– astigmatismo 77
– defectos del 77
– hipermetropía 77
– ligera descripción del 74
– miopía 77
– persistencia de las imágenes 79
– poder separador 79
– presbicia 77
– proceso de la visión 75
onda, cómo se propaga una 94, 97
– de radiofrecuencia modulada 474
– ecuación de una 100
– fase de una 103
– fotografía instantánea y cinematográfica de una 102
– longitud de (color) 124
– medición aproximada de una longitud de 155
– medición de una longitud de 148
– movimiento oscilatorio de cada partícula 99
ondas 93
– clasificación de las 95
– cortas 450
– de audiofrecuencia 473
– de radiofrecuencia 473

electromagnéticas 215
– largas 450
– longitudinales 95
– principio de Huygens 108
– portadoras de energía 93
– superpuestas 105
– – diferencia de fase y diferencia de camino 106
– – interferencia y diferencia de caminos 107
– transversales 95
– ultrasónicas 120
óptica, instrumentos de 74
osciló grafo de rayos catódicos 467
oscuridad 145

Pantallas electrostáticas 203
pararrayos 204
partículas elementales, antimateria 514
péndulo, atracciones y repulsiones del 194
permeabilidad, elevada 382
– de una sustancia 377
– magnética 180
– propiedades de la 378
– tabla de 379
– variable 381
pila, de Daniell 304, 307
– de Galvani y Volta 303
– origen de la energía eléctrica de la 309
– medición de la fuerza electromotriz de una 276
– medición de la resistencia interna de una 277
– polarización de la 310
– seca 310
pirómetro de resistencia 262
– termoeléctrico 315
Planck, constante de 481
– teoría de los cuantos 485
polarización de la luz 157, 167
– al refractarse 162
– imagen fantasma 157
– total y parcial 161
– vibraciones luminosas 159
polarizador y analizador 166
polaroid 169
– aplicaciones 170
automovilismo nocturno 170
– cinematografía en relieve 170
– fotoelasticidad del 170
positrón 514
potencia de un aparato eléctrico 238
– de un conductor 345
– de ruptura de un aislante 338
– unidades de (equivalencia) 239
potencial, diferencia de 237
– y fuerza electromotriz 237
– eléctrico, tensión, voltaje o diferencia de 240
– variable, diferencia de 269
potenciómetro 269
precipitador de Cottrel 341
presbicia 77
principio de la conservación de la energía 408
– de la dínamo 367
– del motor eléctrico 360
– de los acumuladores 311
prisma 60
– ángulo de refringencia 60
– arista refringente del 60
– de reflexión total 57
– desviación mínima 61
– – e índice de refracción 61
– nicol 166
protón 500

radar 450
radiaciones, detector de 506
radiactividad, artificial 524
– conclusiones 511
– descubrimiento de la 214, 503
– desintegración espontánea 509
– isótopos 507
– nuevas sustancias 503
– radiaciones radiactivas 504
– vida media 511
radioastronomía 451
radiofrecuencia modulada 474
– ondas de 473
radioisótopos 532
radiotelefonía 472
– ondas de audiofrecuencia 473
radiotelescopio 463
rayo incidente 26
– reflejado 26
– refractado 50
rayos alfa 216

– beta 216
– canales o positivos 507
– catódicos 457
– cósmicos 523
– gamma 216
– X 479
– – aplicaciones 483
– – cómo se producen 480
– – qué son 481
– – tubo de Coolidge 480
reactores atómicos 530
reactancia capacitativa de un conductor 437
receptor, aparato 474
receptores, circuito eléctrico 228
rectificación de una corriente eléctrica 441
redes de difracción 155
reflexión, ángulo de 26
– del sonido 118
– de la luz, ángulos límites 56
– difusión 25
– espejismo 58
– imágenes 26
– leyes 26
– prismas 57
– total 54
refracción, ángulo límite de 56
– de la luz 48
– – índice relativo y absoluto 51
– – índice y color 125
– – índices 52
– – en lámina de caras paralelas 59
– – leyes 50
refringencia, ángulo de 60
regla, de Lenz 365
– de la palma de la mano izquierda 393
– de las agujas del reloj 358
– del tirabuzón 356
relais o relevadores 390
reluctancia 387
remanencia 382
reóstato 253
resistencia eléctrica 253
– caída de tensión 256
– de un conductor 258
– específica 261
– fuerza electromotriz 257
– ley de Ohm 255
– medición de una 274
– óhmica 431
– unidad 254
resonancia 117
Römer, medición de la velocidad de la luz 8
Roentgen, rayos 479
Ruhmkorff, bobina de 426
Rutherford, experiencia de 496

elf, potencia consumida en una 435
semiconductores 263
separación, ángulo de 79
serie electromotriz 306
series espectrales 137
sincro-ciclotrón 519
solenoide (bobina) 359
– anular o toroidal 373
sonido 111
– absorción del 120
– diapasón 116
– intensidad, altura 115
– velocidad (agua y sólidos) 114
– velocidad de propagación 113

ales, descubrimiento de 188
teléfono 413
telégrafo 391
telegrafía sin hilos 447
telescopio 42
– de Monte Palomar 42
– newtoniano 42
– República Argentina 42
televisión 476
tensión 240
– caída de 256
– de potencial eléctrico 240
– total y parciales 246
– y energía 243
termocuplas, f. e. m. 315
termoelectricidad 314
termostatos 283
Thompson, primeras pruebas de la existencia del electrón 214, 455
timbre 116
tirabuzón, regla del 356
Tolomeo, estudio experimental de 53

trabajo y energía, unidades (equivalencia) 238
transuránicos, elementos 537
transmutaciones 515
transformador 425
triodo, esquema 468

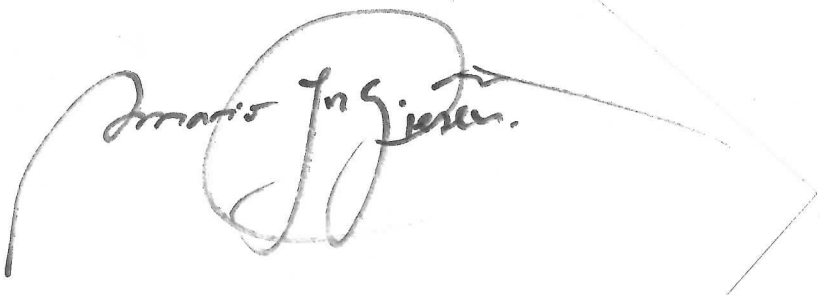
Unidad CGS de masa magnética 321
unidad de, cantidad de electricidad (coulomb) 232
– cantidad de luz (lumen) 22
– densidad de flujo (gauss) 378
– diferencia de potencial (volt) 242
– energía (electrón-volt) 459
– f. e. m. (volt) 249
– flujo (maxwell) 375
– fuerza magnetomotriz (gilbert) 388
– iluminación (lux) 16
– intensidad de la corriente eléctrica (ampere) 232
– intensidad luminosa (violle y bujía decimal) 14
– potencia de una lente (dioptría) 73
– reluctancia 387
– resistencia eléctrica (ohm) 254
uranio, familia radiactiva del 510

Válvulas electrónicas 468
Van der Graff, acelerador de 51, 209
velocidad, fotoelectrones 488
– flujo eléctrico 404
– instantánea del flujo 420
– sonido 113
– transporte de la energía eléctrica 277
– variación de flujo 404
violle, unidad de la intensidad luminosa 14
visión 5, 75
volt, unidad de diferencia de potencial 242
– unidad f. e. m. 249
Volta, pila de 227, 303
voltaje 240
– de potencial eléctrica 240
– y amperaje 252
voltímetro 400

Wheatstone, puente de 275
Wilson, cámara de 458
Wolf, electrómetro de 330

Young, Thomas 145

Zworykin, ionoscopio de 476

La EDITORIAL KAPELUSZ S.A. dio término a la decimosexta tirada de la séptima edición de esta obra, que consta de 4.000 ejemplares, en el mes de febrero de 1986, en los Talleres Gráficos D'Aversa e Hijos S.A., Vicente López 318, Quilmes Oeste.

K — 20.086